

**DLR-IB-MF-OP-2017-246**

**Analyse von Verhalten und  
Detektierbarkeit von  
Radarreflektoren**

**Diplomarbeit**

Hendrik Beuchel



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**



## Dokumenteigenschaften

Titel	Analyse von Verhalten und Detektierbarkeit von Radarreflektoren
Betreff	Diplomarbeit
Institut	Institut für Methodik der Fernerkundung
Erstellt von	Hendrik Beuchel
Beteiligte	Björn Tings (Betreuer), Dr. Domenico Velotto (Betreuer)
Geprüft von	
Freigabe von	
Datum	04. Dez. 2017 Prof. Dr. M. Eineder
Version	1.0
Dateipfad	Dokument2





Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



**HSB**  
Hochschule Bremen  
City University of Applied Sciences

# Diplomarbeit

Hendrik Beuchel

## Analyse von Verhalten und Detektierbarkeit von Radarreflektoren auf See.

Für die Prüfung zum Diplom- Wirtschaftsingenieur (FH) der Fachrichtung Seeverkehr (Nautik)

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Methodik der Fernerkundung, SAR Signalverarbeitung

Forschungsstelle Maritime Sicherheit

Bearbeitungszeitraum: 16.12.2016 – 24.03.2017

Matrikel Nummer: 229179

1. Prüfer: Prof.Kapt. Thomas Jung

2. Prüfer: Kapt. Christian Bahlke

## Inhaltsverzeichnis

I.	Danksagung .....	I
II.	Erklärung.....	II
III.	Abbildungsverzeichnis .....	III
IV.	Tabellenverzeichnis.....	IV
V.	Formelverzeichnis.....	V
VI.	Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1	Einleitung.....	1
2	Radartechnik.....	2
2.1	Grundlagen .....	2
2.2	Grundsätzliches Radarprinzip .....	3
2.2.1	Entfernungsmessung .....	4
2.2.2	Richtungsbestimmung .....	5
2.2.3	Maximale, eindeutige Messentfernung.....	5
2.2.4	Minimale Messentfernung .....	5
2.2.5	Winkel- und Querauflösungsvermögen .....	6
2.2.6	Entfernungsauflösung.....	6
2.2.7	Geschwindigkeitsmessung.....	7
2.2.8	Polarisation .....	7
2.2.9	Rauigkeit der Oberfläche .....	7
2.3	Radarquerschnitt RCS .....	8
2.4	Radarfrequenzen .....	10
2.4.1	C- Band (4 GHz bis 8 GHz).....	10
2.4.2	X- Band (8 GHz bis 12 GHz) .....	11
2.5	Natürliche, negative Effekte auf Radarsignale .....	11
2.6	Seaclutter.....	12
2.7	Speckle.....	13
3	Synthetic Aperture Radar .....	14
3.1	Entwicklung der Radarfernerkundung.....	14
3.2	Grundlagen SAR .....	14
3.3	Auflösung in Azimut.....	16
3.4	Auflösung in Range .....	17

3.5	Bildgeometrie und Bilddarstellung .....	17
3.6	Produkt- ID Bezeichnung von TerraSAR-X und Sentinel 1 .....	18
4	Die Satelliten .....	20
4.1	TerraSAR-X/ TanDEM-X .....	20
4.2	Sentinel 1 a/b .....	22
4.3	Aufnahmemodi .....	24
4.3.1	TerraSAR X/ TanDEM X .....	24
4.3.2	Sentinel 1 .....	25
5	Erkennung maritimer Objekte auf SAR- Bildern .....	27
5.1	Allgemeines .....	27
5.2	SAR Parameter .....	27
5.3	Vorselektierung .....	28
5.4	Diskriminierung .....	29
5.5	Wind- und Wellendetektion .....	30
6	Versuchsaufbau .....	31
6.1	Vorversuche .....	31
6.2	Der trihedrale Winkelreflektor .....	31
6.3	Das Floß .....	32
6.4	Die Schiffe .....	33
7	Wissenschaftliche Auswertung .....	34
7.1	Datengrundlage .....	34
7.2	Darstellung der Ergebnisse .....	36
8	Diskussion .....	46
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	48
10	Anhang .....	49
10.1	Literaturquellen .....	49
10.2	Internetquellen: .....	50
10.3	Bilder .....	51

## I. Danksagung

Bei der Entstehung einer wissenschaftlichen Arbeit, egal in welcher Form, gehört nicht nur Disziplin und Zeitdruck, sondern auch die Unterstützung einer ganzen Reihe von Freunden, Familie und Betreuern dazu. Dieses ist die erste Arbeit in dieser Form und zugleich auch die Wichtigste in meiner –nennen wir es mal- Karriere als Student. Einen ganz besonderen Dank möchte ich Björn Tings aussprechen für die Begleitung meiner Arbeit, für die Geduld, sich meiner Fragen anzunehmen und für das Korrekturlesen, was nicht nur einmal anstand. Einen ganz herzlichen Dank gilt auch meinen Eltern, die sich aufopferungsvoll meiner angenommen haben. Meinem Papa für das Korrektur lesen und Beraten, meiner Mama, dass ich mich immer komplett auf meine Arbeit konzentrieren konnte und in den Pausen etwas zu Essen auf dem Tisch stand. Danke auch für die kleinen Leckereien zwischendurch.

Weiterhin möchte ich meiner Partnerin Juli und meinen Geschwistern Svenja und Basti für die mentale Unterstützung und auch für manche Korrektur danken. Besonderen Dank auch an Totter, Latif, Kiki, Niki, Linda und Jannik für das Bereitstellen eines Schlafplatzes in Bremen.

Vielen Dank auch an das Team vom DLR, das mich immer herzlich in ihren Reihen aufgenommen hat und mit denen ich beim Essen die eine oder andere Frage durchdiskutieren konnte.

Zu guter Letzt einen großen Dank an IBL Oldenburg, die Besatzungen der Schiffe und Herrn Senner, ohne die kein einziges Bild mit Reflektor hätte entstehen können. Es war eine super Zeit auf den Schiffen.



## II. Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

X

---

Nienstädt, den 22.03.2016 Hendrik Beuchel

### III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum .....	3
Abbildung 2: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Impulsradars .....	3
Abbildung 3: Signalausbreitung.....	4
Abbildung 4: Zusammenhang Winkel- und Querauflösung.....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle.....	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung von Streumechanismen an unterschiedlich rauen Oberflächen .....	8
Abbildung 7: Strahlengang bei einem Winkelreflektor .....	9
Abbildung 8: Berechnung RCS ausgewählter trihedraler Winkelreflektoren .....	9
Abbildung 9: Atmosphärische Dämpfungsverluste .....	12
Abbildung 10: Speckle. Rückstrahlung an Wellen, vektoriell dargestellt .....	13
Abbildung 11: Links: Darstellung der Radargeometrie mit Azimut, Nadir und Entfernung. Rechts: Darstellung der Winkelgeometrie .....	15
Abbildung 12: Abbildung verschiedener Oberflächen mit SAR .....	18
Abbildung 13: Aufnahmemodi TerraSAR-X.....	24
Abbildung 14: Aufnahmemodi Sentinel 1 .....	26
Abbildung 15: Links: typischer Aufbau einer beweglichen Matrize für einen Algorithmus mit adaptivem Grenzwert; rechts: Target Box mit Target. ....	29
Abbildung 17: Beaufortskala links und Seegangsskala rechts, nach Petersen .....	51
Abbildung 18: Offshore Windanlagen in der Deutschen Bucht.....	52
Abbildung 19: Satellit Sentinel 1.....	53
Abbildung 20: Übersicht Aufnahmemodi Sentinel 1 .....	53
Abbildung 21: Sentinel 1 HV ExtraWide vom 11.05.16. Dänemark und Deutsche Bucht. Erkennbar sind die fünf Aufnahmestreifen des EW- Modus. ....	53
Abbildung 22: Satellit TerraSAR-X.....	54
Abbildung 23: Übersicht Aufnahmemodi TerraSAR-X .....	54
Abbildung 24: TerraSAR-X und TanDEM-X Helixformation .....	55
Abbildung 25: TerraSAR-X HH StripMap vom 10.05.16. Links Windpark BARD. Rechts Windpark Global Tech 1.....	55
Abbildung 26: Vorversuch mit XPS Schaumplatte und Grillschalen .....	56
Abbildung 27: Floß mit Schwimmhilfen und Cornerreflector.....	57
Abbildung 28: Floß mit CR während des Ausbringens am 26.05.16.....	57
Abbildung 29: Strömungskarte Deutsche Bucht vom 10.05.16.....	58
Abbildung 30: Lüneburg- Linse mit Reflektorschicht und Strahlengang.....	59

## IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der relevanten Wellenbereiche in der Fernerkundung.....	10
Tabelle 2: TerraSAR-X Daten tabellarisch.....	21
Tabelle 3: Sentinel 1 Daten tabellarisch .....	23
Tabelle 4: Azimutauflösung und Szenenbreite der TerraSAR-X Aufnahmemodi .....	25
Tabelle 5: Azimutauflösung und Szenenbreite der Sentinel 1 Aufnahmemodi .....	26
Tabelle 6: Maße und Daten der verwendeten Schiffe .....	33
Tabelle 7: Übersicht der verwendeten TS-X Datensätze.....	34
Tabelle 8: Übersicht der verwendeten Sentinel 1 Datensätze.....	34
Tabelle 9: Liste der Satellitenüberflüge mit div. Daten .....	35
Tabelle 10: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 24.04.16 TerraSAR-X. ....	37
Tabelle 11: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 10.05.16 TerraSAR-X. ....	38
Tabelle 12: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 11.05.16 TerraSAR-X. ....	39
Tabelle 13: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 26.05.16 TerraSAR-X. ....	40
Tabelle 14: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 27.05.16 TerraSAR-X. ....	41
Tabelle 15: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Fotografie vom 11.05.16 Sentinel 1. ....	42
Tabelle 16: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Fotografie vom 23.05.16 Sentinel 1. ....	43
Tabelle 17: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Fotografie vom 17.07.16 Sentinel 1. ....	44
Tabelle 18: Windstärken und Wellenhöhen TS-X zusammengefasst.....	45
Tabelle 19: Windstärken und Wellenhöhen Sentinel 1 .....	45

## V. Formelverzeichnis

Formel 1: Entfernungsmessung mit Laufzeit .....	4
Formel 2: Klassische Radargleichung.....	5
Formel 3: Minimale Messentfernung Radar.....	5
Formel 4: Winkelauflösung im Bogenmaß .....	6
Formel 5: Querauflösung.....	6
Formel 6: Rayleigh- Kriterium für glatte Oberflächen .....	7
Formel 7: Rückstrahlfläche [m <sup>2</sup> ] trihedraler Winkelreflektor .....	9
Formel 8: Umrechnung von m <sup>2</sup> in dBm <sup>2</sup> .....	9
Formel 9: Winkelauflösung einer realen Apertur.....	16
Formel 10: Winkelauflösung einer synthetischen Apertur.....	16
Formel 11: Länge der synthetischen Apertur .....	16
Formel 12: max. Auflösung synthetische Apertur .....	16
Formel 13: Entfernungsauflösung .....	17
Formel 14: PFA Probability of False Alarm.....	28
Formel 15: Target- Ermittlung mittels SAINT .....	29
Formel 16: RCS max. Winkelreflektor .....	32
Formel 17: RCS max. für den im Versuch genutzten CR .....	32
Formel 18: Umrechnung der kalibrierten Intensitätswerte.....	36
Formel 19: Berechnung Kantenlänge CR für Sentinel 1.....	47
Formel 20: Berechnung Kantenlänge CR für Sentinel 1.....	47

## VI.Abkürzungsverzeichnis

µs .....	Mikrosekunden
Abb.....	Abbildung
Bft .....	Beaufort
bzw.....	beziehungsweise
CFAR.....	Constant False Alarm Rate
cm .....	Zentimeter
CR.....	Corner Reflector
dB.....	Dezibel
DLR.....	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EM.....	Elektromagnetisch
ESA .....	European Space Agency
etc. ....	et cetera
EW.....	Extra Wide Swath
GHz .....	Giga Hertz
GRD .....	Ground Range Detected
GTC.....	Gain Time Control
ID .....	Identität
IMO .....	International Maritime Organisation
ISAR.....	Inverse Synthetic Aperture
IW .....	Interferometric Wide Swath
kg .....	Kilogramm
kHz .....	Kilohertz
km .....	Kilometer
kn .....	Knoten
LCT .....	Laser Communication Terminal
m .....	Meter
m/s.....	Meter pro Sekunde
m <sup>2</sup> .....	Quadratmeter
MHz.....	Mega Hertz
mm.....	Millimeter
MMSI .....	Maritime Mobile Service Identity
NASA .....	National Aeronautics and Space Administration
OCN.....	Ocean Mode
PDF.....	Probability Density Function
PFA .....	Probability of False Alarm
PPP.....	Public Private Partnership
PRF .....	Pulse Repetition Frequency
RADAR.....	Radio Detection and Ranging
RAR .....	Real Aperture Radar
RCS.....	Radar Cross Section
S/E.....	Senden-/Empfang
SAINT .....	SAR AIS Integrated Toolbox
SAR.....	Synthetic Aperture Radar
SC .....	ScanSAR
SL .....	Spotlight

SLAR .....	<i>Side Looking Airborne Radar</i>
SM .....	<i>Stripmap</i>
SNAP .....	<i>Sentinel Application Platform</i>
STC .....	<i>Sensitivity Time Control</i>
TD-X .....	<i>TanDEM-X</i>
TOPSAR .....	<i>Terrain Observation with Progressive Scans SAR</i>
TS-X .....	<i>TerraSAR-X</i>
ü.a. ....	<i>über alles</i>
UTC .....	<i>Universal Time Coordinated</i>
WRF .....	<i>Weather Research and Forecast- Model</i>
WV .....	<i>Wave</i>

# 1 Einleitung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt seit 2007 den ersten deutschen, zivilen Erdbeobachtungssatelliten TerraSAR-X (TS-X) und seit 2010 den baugleichen Satelliten TanDEM-X (TD-X). Bei den beiden Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X handelt es sich um Radarsysteme mit synthetischer Apertur, die im X-Band arbeiten und die Erde in 514 km Höhe in einer Art Helixformation umkreisen. Daneben umkreisen die Schwestersatelliten Sentinel 1 a und b der European Space Agency (ESA) seit 2014 (Sentinel 1b seit 2016) die Erde. Auch sie arbeiten mit einer aktiven Radarantenne, welche jedoch im C- Band sendet. Mittels verschiedener Prozessierungsarten können aus den Rohdaten der Satelliten unterschiedliche Informationen über die Erdoberfläche gewonnen werden. Diese Daten lassen sich für eine Vielzahl von – hauptsächlich wissenschaftlichen – Anwendungen nutzen.

Einige Beispiele sind das Erstellen von Karten und digitalen Geländehöhenmodellen, die Bestimmung von Biomasse in einem Gebiet, Gletscherbewegungen sowie die Gewinnung von Verkehrs- informationen. Interessant ist der Einsatz solcher Satelliten auch, um nach einer Umweltkatastrophe, unabhängig von den Wetterbedingungen, möglichst schnell ein Bild der Lage zu erhalten sowie für die Kartierung von Gebieten, welche ständig mit Nebel bedeckt und somit der optischen Aufklärung nicht zugänglich sind. In den letzten Jahren wurde die Erforschung der Satelliten als Unterstützung für maritime Lagebilder stark voran getrieben. So können beispielsweise MetOcean- Informationen wie Seegangshöhe, Windstärke und Meereisdrift sowie Meereistypen abgeleitet oder Schiffe und Gefahrstoffver- schmutzungen erkannt werden.

In dieser Arbeit soll auf experimenteller Basis die Fragestellung untersucht werden, ob mit der Radartechnologie von TerraSAR-X, TanDEM-X und Sentinel 1 a/b, maritime Objekte mit ausreichender Sicherheit erkannt werden können. Hierzu wurde in mehreren Ausfahrten ein Radarreflektor ausgesetzt und mittels der Satelliten aufgenommen. Das Auswerten der erhaltenen Radarbilder erfolgt manuell aber auch automatisch, durch eine vom DLR entwickelte Software.

In dieser Arbeit werden zunächst die grundlegende Theorie der Radartechnik beschrieben, in dem erklärt wird, auf welcher Grundlage elektromagnetische Strahlung zur Erkennung von Gegenständen in einer gewissen Entfernung genutzt werden kann (Kapitel 2.1 und 2.2). In Kapitel 2.3 beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Verhalten von Reflexionsobjekten und deren Eigenschaften und in Kapitel 2.4 mit den unterschiedlichen Frequenzen und Frequenzbändern.

In Kapitel 2.5 bis 2.7 wird auf natürliche Effekte eingegangen, die kontraproduktiv auf die Ausbreitung von Radarsignalen wirken, bzw. Fehlechos verursachen und somit Falschziele in der Auswertung anzeigen.

Das Kapitel 3 beinhaltet die Systematik und baulichen Gegebenheiten des Synthetic Apertur Radar, welches das Hauptinstrument der Forschung war.

In Kapitel 4 werden die Aufgaben der zwei Satelliten (TerraSAR- X und Sentinel 1) erläutert, ihre baulichen Unterschiede und ihre Flugbahnen.

Die automatisierte Software zur Erkennung von Reflexionsobjekten wird in Kapitel 5 behandelt. Es wird beschrieben, nach welchen Kriterien das Programm arbeitet und wie ein Ziel extrahiert wird.

In Kapitel 6 wird der Versuchsaufbau erläutert. Welche Gerätschaften genutzt wurden und welches die Versuchsträger waren. Es wird ein Überblick der Schiffe gegeben und es wird über erste Erfahrungen mit der Radarfernerkundung berichtet.

Die wissenschaftliche Auswertung mit den Versuchsergebnissen findet in Kapitel 7 statt.

In Kapitel 8 wird die Diskussion geführt, Überlegungen und Ergebnisse ausgewertet und diskutiert.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten zu dem in dieser Arbeit behandelten Thema wird in Kapitel 9 gegeben.

## 2 Radartechnik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der grundlegenden Radartechnik, welches die Basis für den Aufbau des Synthetic Aperture Radar ist. Es soll ein Überblick gegeben werden, was Radar bedeutet, wie es aufgebaut ist und wie es eingesetzt wird. In Kapitel 2.2 wird erörtert, unter welchen Bedingungen das Radarverfahren Einschränkungen hinnehmen muss und wo die physikalischen Grenzen des Systems liegen.

### 2.1 Grundlagen

Der Begriff RADAR ist ein Akronym, welches sich aus dem englischen **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging ableitet. Er beinhaltet Methoden zur Entdeckung von Objekten mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen. Hierbei werden die Parameter Lage, Bewegungszustand und Beschaffenheit des Objekts bestimmt (DETLEFSEN, 1989).

Radarsysteme ermöglichen die natürlich vorhandene Umgebungsbeobachtung zu erweitern. Unser optischer Erfassungsbereich und die damit verbundene Reichweite, kann wesentlich erweitert werden. Er wird auch von Witterungs- und Beleuchtungsbedingungen (Nacht) unabhängig, da das Radar sein Ziel quasi selbst beleuchtet und bei geeigneter Wellenlängenwahl Wolken und Niederschläge durchdringt. Allerdings bestehen auch Nachteile gegenüber unseren natürlichen, optischen Auffassungsmöglichkeiten. Farbsehen entfällt beim Radar. Sind auf Radarbildschirmen Farben vorhanden, handelt es sich um sog. Fehlfarbenkodierung, um eine bessere Übersicht zu generieren. Auch ist die Feinauflösung auf Grund der viel kleineren Wellenlängen beim optischen Sehen deutlich besser (DETLEFSEN, 1989; KLAUSING/ HOLPP, 2000).

Abhängig von der Frequenz der Radarstrahlung werden bei Nebel, Regen oder Schnee mehr oder weniger Einschränkungen hinsichtlich der Nutzung anzutreffen sein. Es ist im Vergleich zu optischen Systemen in der Lage, bei wesentlich größeren Reichweiten genaue Entfernungs- und Bewegungsangaben zu liefern (DETLEFSEN, 1989; KLAUSING/ HOLPP, 2000).

Man unterscheidet zwischen Primär- und Sekundärradar, wobei beim Primärradar (Radar) die vom Ziel reflektierte Strahlung verarbeitet wird. Beim Sekundärradar hingegen wird auf eine automatisierte Abfrage zurückgegriffen (Transpondertechnik), bei der das Ziel, nach der Interrogation, auf der gleichen oder einer anderen Frequenz antwortet. Als Ziel (oder englisch „Target“) bezeichnet man Objekte, die elektromagnetische Wellen reflektieren. Die gängigen Radarfrequenzen erstrecken sich von 300 MHz bis 110 GHz und sind in der folgenden Grafik als „Radar- Verfahren“ gekennzeichnet. Weiterhin zeigt die Grafik das elektromagnetische Spektrum angefangen von Röntgen bis hin zu Radiowellen. Die Grafik soll der Einschätzung dienen, welche Wellenlängen das Spektrum umfasst und in wieweit die Wellenlängen Einfluss auf die atmosphärische Durchlässigkeit haben (KLAUSING/ HOLPP, 2000; GÖBEL, 2011).



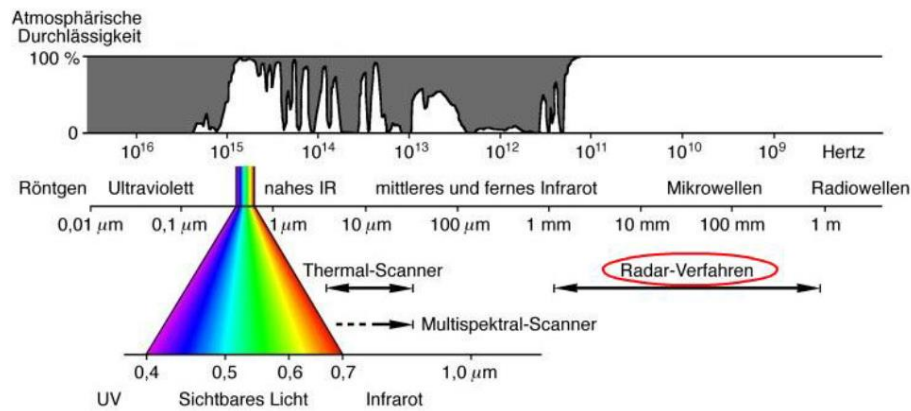


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum (veränderte Darstellung aus Albertz, 2009)

## 2.2 Grundsätzliches Radarprinzip

Ein Radargerät arbeitet nach dem Echoprinzip, wobei gerichtete, elektromagnetische Energie mit Hilfe einer Antenne in den Raum abgestrahlt wird und von Objekten reflektiert, absorbiert, gebeugt und gestreut wird. Die Reflektion, bzw. Absorption ist nur bei Objekten möglich, die sich in ihren elektromagnetischen Eigenschaften (Dielektrizitätskonstante, Permeabilität und Leitfähigkeit) von den Eigenschaften des Ausbreitungsmediums (Atmosphäre) unterscheiden (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

Beugung von elektromagnetischer Strahlung wird in dieser Arbeit aus Komplexitätsgründen nicht weiter berücksichtigt.

Das Radargerät ist vereinfacht so aufgebaut, dass ein Zeitgeber eine Taktung vorgibt, die Sendebeginn und -ende steuert und dem Empfänger durch die zeitliche Vorgabe ermöglicht, die gesendeten und empfangenen Signale einander zuzuordnen. Der S/E-Schalter schaltet nach Ende des ausgehenden Signals automatisch auf Empfang um. Nach einer vorgegebenen Zeitspanne schaltet das System zurück auf Senden. Richtungs- und Entfernungsbestimmung werden unter Punkt 2.2.1 und 2.2.2 erörtert.

Somit können Objekte und ihre Position nach Richtung und Entfernung bestimmt werden sowie grundsätzliche Aussagen über ihre Geschwindigkeit und auch bedingt über ihre Größe gemacht werden.

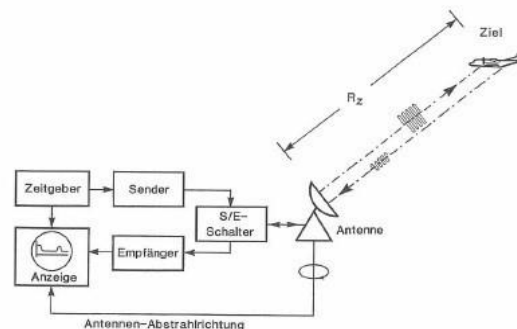


Abbildung 2: Vereinfachtes Blockschaftbild eines Impulsradars (aus Klausing/ Holpp, 2000)

Wird das Signal von der Antenne ausgesendet bzw. kehrt das Signal dorthin zurück, ist es dem Einfluss der Atmosphäre (Wolken, Nebel, Regen, Schnee) und der Erdoberfläche (Bodenbeschaffenheit, Vegetation, Wasser) ausgesetzt. In der Atmosphäre wird das Signal durch Dämpfung, Brechung, Streuung und Reflexion abgeschwächt, die Erdoberfläche hingegen stört das Signal durch Reflexion und Streuung (KLAUSING/ HOLPP, 2000). Siehe auch 2.5.

Die Dämpfung innerhalb der Atmosphäre hängt vom jeweiligen Zustand ab. Viele Schwebstoffe führen hierbei zu einer größeren Dämpfung, Brechung und/oder Reflexion.

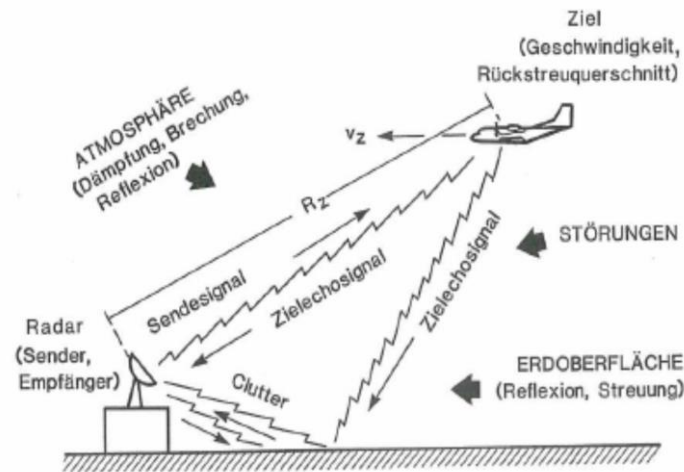


Abbildung 3: Signalausbreitung (Klausing/ Holpp, 2000)

Zurückgeworfene Energie wird von der Empfangsantenne aufgefangen und nach den Kriterien Amplitude, Frequenz, Phase, Polarisierung und Laufzeit verarbeitet (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

### 2.2.1 Entfernungsmessung

Empfängt die Antenne das reflektierte Signal, kann der Rechner aus der Laufzeit  $t$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  die Entfernung ermitteln. Je nach angepeiltem Objekt wird dabei eine Schrägentfernung gemessen, weil das Ziel meist nicht auf derselben Höhe wie die Radarantenne liegt. Da bei der Laufzeitmessung Hin- und Rückweg berücksichtigt werden muss, ergibt sich folgende Gleichung zur Entfernungsmessung:

$$R_z[km] = \frac{c_0 \times t_L[\mu s]}{2}$$

Formel 1: Entfernungsmessung mit Laufzeit (Klausing/ Holpp, 2000)

Dabei ist  $R_z$  die Entfernung in Kilometern,  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit mit  $3 \times 10^8$  m/s und  $t_L$  die Laufzeit in Mikrosekunden.  $12,35 \mu s$  entsprechen 1852 m - oder anders gesagt - das Signal benötigt  $12,35 \mu s$ , um eine Radarmeile zu überbrücken.

### 2.2.2 Richtungsbestimmung

Die Richtungsbestimmung erfolgt direkt über das eingehende Signal. Die Winkelmessung wird dadurch ermöglicht, dass die Antenne genau in die Richtung zeigen muss, aus der sie das Echosignal empfängt. Da die Radarkeule 360° abdeckt, kann der Winkel zwischen dem 0°- und dem Zielvektor, projiziert auf die Horizontale, im Uhrzeigersinn gemessen werden. Dabei gilt, je größer die Antenne, desto präziser ist die Richtungsbestimmung möglich (MOREIRA, 2001).

### 2.2.3 Maximale, eindeutige Messentfernung

Ein von der Radarantenne ausgesendeter Impuls ist durch zwei Eigenschaften begrenzt. Zum einen verliert der Impuls über die Laufzeit an Energie, sodass ab einer bestimmten Entfernung, keine messbaren Reflektionen am Empfänger detektiert werden können. Zum anderen, wenn das vollständige Signal gar nicht oder nur teilweise in das zeitliche Messfenster des Empfängers fällt (Totzeit). Der Energieverlust mit steigender Laufzeit wird durch die folgende Radargleichung bestimmt.

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_S \times G^2 \times \lambda^2 \times \sigma}{P_E \times (4\pi)^3}}$$

Formel 2: Klassische Radargleichung (Skolnik, 2008)

Dabei ist  $R$  die Reichweite,  $P_S$  die Sendeleistung,  $G$  der Antennengewinn<sup>1</sup>,  $\lambda$  die Wellenlänge (gilt fortlaufend),  $\sigma$  die effektive Rückstrahlfläche und  $P_E$  die Leistung am Empfänger.

Konkrete Falschanzeigen erfolgen bei meteorologischen Phänomenen, die unter dem Fachwort Überreichweiten zusammengefasst sind (z.B. Ducting, Suprarefraktion). Dabei fällt das zurückkommende Signal in das Empfangsfenster der übernächsten oder folgenden Empfangssequenzen und werden gleichzeitig mit den aktuellen, ankommenden Pulsen verarbeitet und falsch dargestellt (SKOLNIK, 2008).

### 2.2.4 Minimale Messentfernung

Die Arbeitsfähigkeit ist bei Empfänger-/ Senderkombinationen im Nahbereich limitiert. Durch hohe Sendeleistungen muss der Empfänger beim Senden abgeschaltet werden, da es sonst zu Beschädigungen an diesem kommen kann. Ist das reflektierte Signal aufgrund der kurzen Entfernung schneller zurück als die Empfangsbereitschaft des Empfängers hergestellt ist, kommt es zu Messfehlern. Deshalb werden Sendezeiten so kurz wie möglich gehalten. Die kürzeste Messentfernung ( $R_{\min}$ ) wird durch folgende Formel berechnet:

$$R_{\min}[m] = \frac{c_0 \times (\tau + t_{rec})}{2}$$

Formel 3: Minimale Messentfernung Radar

Dabei ist  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit mit  $3 \times 10^8$  m/s,  $\tau$  die Sendezeit und  $t_{rec}$  die Schalt- oder Erholzeit, um von Senden auf Empfangen umzuschalten (SKOLNIK, 2008).

<sup>1</sup> Der Antennengewinn fasst Richtwirkung und Wirkungsgrad einer Antenne zusammen.

### 2.2.5 Winkel- und Querauflösungsvermögen

Winkel- und Querauflösungsvermögen hängen voneinander ab. Beim menschlichen Auge sind durch die bis zu einem Faktor von  $10^5$  kleineren Wellenlängen wesentlich bessere Auflösungen zu erreichen. In der Radartechnik sind durch die größeren Wellenlängen entsprechend schlechtere Winkelauflösungen vorgegeben. Sie werden rechnerisch durch das Verhältnis von Wellenlänge des Sendesignals und der Antennengröße erfasst (Formel 4). Wobei  $\lambda$  [m] die Wellenlänge des Sendesignals ist und  $d$  [m] die Antennengröße wiedergibt (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

$$\alpha_w \approx \frac{\lambda}{d}$$

Formel 4: Winkelauflösung im Bogenmaß (aus Klausing/ Holpp, 2000)

Die Querauflösung  $\delta$  ergibt sich aus der Multiplikation von Winkelauflösung  $\alpha_w$  mit der Zielentfernung  $R_Z$ .

$$\delta = \alpha_w \times R_Z$$

Formel 5: Querauflösung (aus Klausing/ Holpp, 2000)

Der Zusammenhang zwischen Winkel- und Querauflösungsvermögen wird in der unten stehenden Abbildung 4 veranschaulicht. Es gilt je größer die Antenne und/oder je kleiner die Wellenlänge, desto besser ist die Winkel- und Querauflösung (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

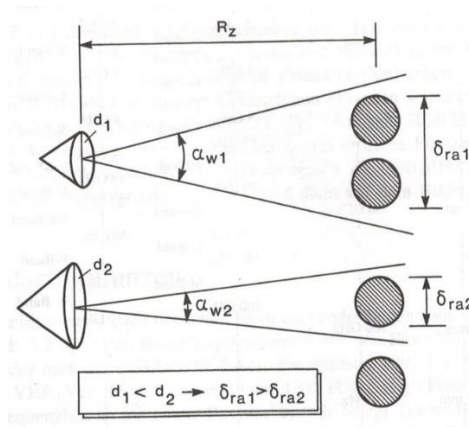


Abbildung 4: Zusammenhang Winkel- und Querauflösung (aus Klausing/ Holpp, 2000)

### 2.2.6 Entfernungsauflösung

Die Entfernungsauflösung erfolgt durch das Aussenden von elektromagnetischer Energie in kurzen Impulsen der Länge  $\tau_p$ , die mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  zum Ziel und zur Antenne reflektiert werden. Damit zwei in radialer Richtung hintereinander liegende Ziele noch getrennt angezeigt werden können, müssen sie so weit auseinander liegen, dass die Empfangssignale sich nicht überlagern. Deswegen gilt, je kürzer die Impulse, desto genauer kann ein Objekt in Entfernungsrichtung aufgelöst werden (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

### 2.2.7 Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeit eines Objekts wird über die Frequenzverschiebung von Sende- zu Empfangssignal nach dem Dopplerprinzip ermittelt. Bei sich bewegenden Zielen kann die Radialgeschwindigkeit bestimmt und mit weiteren Hilfsparametern, zu der letztendlichen Geschwindigkeit des Objektes errechnet werden (SKOLNIK, 2008).

### 2.2.8 Polarisation

Die gesendeten elektromagnetischen Wellen haben stets eine feste Polarisation, das heißt die Richtungen der Schwingung der elektrischen und magnetischen Komponenten sind konstant. Abb. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung einer vertikal polarisierten Welle. Ausschlaggebend für die Bezeichnung ist das vertikal ausgerichtete elektrische Feld. Bei Radar-Systemen wird für gewöhnlich entweder horizontal oder vertikal polarisiert gesendet. Durch die Eigenschaft der Erdoberfläche EM-Wellen zu depolarisieren, also die Schwingungsrichtung zu verändern, ist bei Radar-Systemen zusätzlich die Polarisation der empfangenen Wellen von Interesse. Die herkömmlichen Aufnahme Strategien sind die horizontale Aussendung und horizontaler Empfang HH, vertikale Aussendung und vertikaler Empfang VV sowie die sogenannten Kreuzpolarisationen HV und VH. Je nach beleuchteter Fläche sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Polarisationen mitunter sehr stark. Die Erforschung dieser Zusammenhänge ist das Gebiet der Polarimetrie. Deren Methoden sind im Rahmen dieser Arbeit weniger wichtig, sodass auf eine genaue Beschreibung verzichtet wird (LILLESAND et al., 2008).

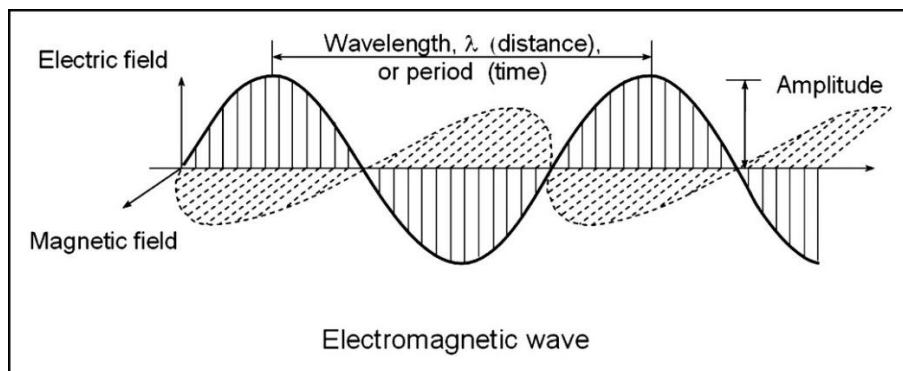


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle (aus <http://tech.snmjournals.org>)

### 2.2.9 Rauigkeit der Oberfläche

Die Rauigkeit einer Oberfläche ist über den Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle definiert. Je rauer eine Oberfläche in Relation zu der gesendeten Welle, desto mehr Fläche ist dem Empfänger zugeneigt und desto mehr Energie wird zu diesem zurückgeleitet. Höhenunterschiede der Oberfläche bewirken kleinskalig eine Phasenverschiebung der einzelnen Wellen zueinander. Entspricht die Höhenabweichung der Oberfläche der Länge der elektromagnetischen Welle, bewirkt dies eine konstruktive Interferenz der einzelnen Wellen, wodurch das Signal verstärkt wird. In der Fachliteratur ist von Bragg- Scattering die Rede, welche von ihren Entdeckern William Lawrence Bragg und William Henry Bragg zum ersten Mal beschrieben wurde. Eine glatte Fläche wird durch das Rayleigh-Kriterium wie folgt physikalisch beschrieben:

$$h < \frac{\lambda}{8 \times \cos \theta}$$

Formel 6: Rayleigh- Kriterium für glatte Oberflächen (Skolnik, 2008)

Dabei ist  $h$  die Standardabweichung der Höhe der Oberfläche,  $\lambda$  die Länge der elektromagnetischen Welle und  $\theta$  der Einfallswinkel relativ zu einer glatten horizontalen Oberfläche. Steigt  $h$ , wird die Phasendifferenz größer, sodass keine Kohärenz<sup>2</sup> zwischen den Wellen gegeben ist und die Wellen diffus in alle Richtungen gestreut werden. Dies ist in Abb. 6 vereinfacht dargestellt.

Bezüglich der Materialeigenschaften ist die elektrische Leitfähigkeit, beziehungsweise Permittivität  $\epsilon$  von Interesse. EM-Wellen können sich in Materialien mit hoher Permittivität nicht ausbreiten, da das elektrische Feld Strömungen erzeugt, die einen Energieverlust zur Folge haben. Somit werden die EM-Wellen von Medien mit hoher Leitfähigkeit stark zurückgestreut (WOODHOUSE, 2006; RICHARDS, 2009).

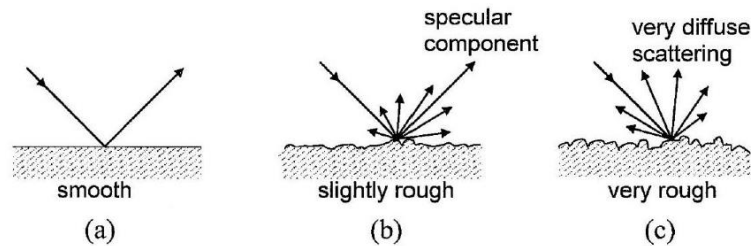


Abbildung 6: Schematische Darstellung von Streumechanismen an unterschiedlich rauen Oberflächen (aus Richards, 2009)

## 2.3 Radarquerschnitt RCS

Für die Radarauswertung ist entscheidend, welche Energiemenge reflektiert wird und den Empfänger erreicht. Diese Reflexionsintensität, kurz Intensität, ist abhängig von der abgestrahlten Energie aber auch von der Größe und der Oberflächenbeschaffenheit (Material, Auftreffwinkel, Absorptionsvermögen) des Zielobjektes. Dementsprechend lassen sich Rückschlüsse aus der am Empfänger aufgenommenen Signale auf z.B. Größe und Struktur des reflektierenden Objektes ziehen. Diese charakteristische Größe für das Zielobjekt wird als Radarquerschnitt Sigma (Radar Cross Section- RCS) bezeichnet (SKOLNIK, 2008).

Um diese Größe zu standardisieren, wird der Vergleichswert einer isotrop reflektierenden Kugel herangezogen und sein Wert mit der des aktuell gemessenen Gegenstandes verglichen. Die Größenordnung wird in  $m^2$  angegeben und ist von Winkel der einfallenden Strahlung, der Frequenz und der Polarisation abhängig. Je größer die RCS eines Objektes ist, desto besser ist es auf der Radaraufnahme zu sehen. Bedingt durch ihre hohe Reflexionseigenschaft sind passive Radarreflektoren wie Cornerreflektoren (CR) somit mit einer besonders hohen RCS ausgestattet. Verantwortlich dafür ist die elektrische Leitfähigkeit und der rechtwinklige Aufbau der drei reflektierenden Platten. Ein sogenannter trihedraler Cornerreflektor bietet bei Radarzielen auf See, wo sich durch Wind- und Wellenbewegungen ständig ändernde Aspektwinkel zum Empfänger bilden, gute Rückstrahlmomente, weil durch die Konstruktion bei jedem Einfallswinkel eine um 180 Grad versetzte Rückstrahlung erreicht wird (Abb. 7) (NICOLAESCU & OROIAN, 2001).

Der Radarquerschnitt ist also eng mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Objekts durch ein Radar verknüpft. Aus diesem Grund wird für Kampfflugzeuge eine kleine RCS angestrebt. Rettungsbojen

<sup>2</sup> Frequenz- und Phasengleich

hingegen weisen eine hohe RCS auf. Im Falle eines Schiffsunglücks erhöhen sie so die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch ein Radar.

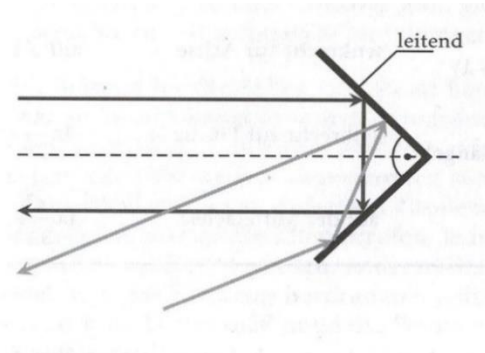


Abbildung 7: Strahlengang bei einem Winkelreflektor (Göbel, 2011)

Die RCS  $\sigma$  eines trihedralen Winkelreflektors lässt sich u.a. mit Formel 7 berechnen. Dabei bezeichnet  $L$  die Länge der sich berührenden Kanten der drei gleichschenkligen Dreiecke und  $\lambda$  die Wellenlänge des Radarsignals. Abbildung 8 zeigt weitere Berechnungen anderer geometrischer Formen eines CR.

$$\sigma[m^2] = \frac{4\pi \times L^4[m]}{3\lambda^2[m]}$$

Formel 7: Rückstrahlfläche  $[m^2]$  trihedraler Winkelreflektor (Nicolaescu & Oroian, 2001)


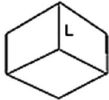

$\sigma_{\max} = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$	
$\sigma_{\max} = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2}$	
$\sigma_{\max} = \frac{15.6\pi L^4}{3\lambda^2}$	

Abbildung 8: Berechnung RCS ausgewählter trihedraler Winkelreflektoren (IEEE Journal, Vol. 8 No 3, 2015)

In einem Rechenbeispiel ergibt sich für einen trihedralen Winkelreflektor mit einer Kantenlänge von 1,2 m, bei einer Frequenz von 9.65 GHz, eine RCS von ungefähr 350.000  $m^2$  oder 55.5  $dBm^2$ . Dies entspräche dem Durchmesser einer isotrop rückstrahlenden Kugel mit dem Radius von 226 m und verdeutlicht die enorme Bedeutung der Geometrie für die Detektierbarkeit von Radarzielen.

In der Radarfernerkundung wird in der Regel mit logarithmischen Maßstäben gearbeitet, um handlichere Werte zu erhalten und Multiplikationen/ Divisionen zu Additionen/ Subtraktionen zu vereinfachen. Die Umrechnung erfolgt wie folgend angegeben:

$$[dBm^2] = 10 \times \log_{10}([m^2])$$

Formel 8: Umrechnung von  $m^2$  in  $dBm^2$



## 2.4 Radarfrequenzen

Radarfrequenzen werden in Bänder unterteilt. Wenn von Radarbändern gesprochen wird, muss vermittelt werden, dass es verschiedene Nomenklaturen dafür gibt. Es ist unerlässlich, dass zur Bandbezeichnung auch die dazugehörige Systembezeichnung angegeben wird. Diese, zu Missverständnissen neigenden Bandbezeichnungen, sind historischen und/oder durch den zivilen oder militärischen Bereich entstanden. So kann in der einen Nomenklatur das L-Band, in der anderen das D-Band sein oder das X-Band das I/J-Band sein. Gängig sind die Bandbezeichnungen nach IEEE- Std- 521 1976 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) und das im militärischen Bereich der Nato genutzte, alphabetisch von den niederen Frequenzen nach den hohen Frequenzen geordnete System. In dieser Arbeit wird das nicht alphabetisch geordnete IEEE System genutzt. Die Wahl des Frequenzbereichs wird im Wesentlichen von den Einsatzbedingungen, wie z.B. geforderte Reichweite, erzielbarer Auflösung, Antennenabmessung, Sendeleistung, Beobachtungszeit und Bandbreite des Sendesignals bestimmt. Bei der Auswahl des Frequenzbereiches gibt es sowohl Vor- als auch Nachteile. Niedrigere Frequenzen erlauben höhere Präzision, haben andererseits kürzere Reichweiten. Mikrowellen können in verschiedene Oberflächen bzw. Materialien eindringen, wobei längere Wellen tiefer eindringen als kürzere Wellen, die auch schon an der Oberfläche reflektiert werden können (KLAUSING/ HOLPP, 2000).

Die für die Fernerkundung im Wesentlichen benutzten Frequenzbänder können aus der Tabelle 1 entnommen werden. Die umfangreichen Frequenzbandbezeichnungen sind in KLAUSING/ HOLPP (2000), LILLESAND et al. (2015) ersichtlich.

<b>Radar Bandbezeichnung</b>	<b>Wellenlänge [cm]</b>	<b>Frequenz [GHz]</b>
P- Band	100,0 – 30,0	0,3 – 1
L- Band	30,0 – 15,0	1 – 2
S- Band	15,0 – 7,5	2 – 4
C- Band	7,5 – 3,8	4 – 8
X- Band	3,8 – 2,4	8 – 12,5

**Tabelle 1: Überblick der relevanten Wellenbereiche in der Fernerkundung (eigene Darstellung).**

Die Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X arbeiten im X- Band, Sentinel 1a/b hingegen im C- Band. Sie sind Gegenstand der Forschungsarbeit. Die verwendeten Bandbreiten werden im Folgenden weiter erläutert.

### 2.4.1 C- Band (4 GHz bis 8 GHz)

Dieses Band arbeitet zwischen 3,75 cm bis 7,5 cm Wellenlänge, in einem Frequenzbereich, der einen guten Kompromiss zwischen Weitbereichsradar (niedrigere Frequenzen) und relativ hoher Auflösung (hohe Frequenzen) darstellt. Es gilt als Allrounder unter den Bandbreiten.

Daher werden Frequenzen in diesen Bereichen verwendet, wenn Systeme mit einer Frequenz beide Aufgabenbereiche abdecken sollen. Typische Verwendungen sind Mittelbereichsradare (Flughafenüberwachung), militärische 3D Überwachungsradare (PATRIOT), Radare mit synthetischer Apertur (SAR) wie Sentinel 1, präzise Schiffsradare für die Verkehrsführung sowie Niederschlagsradare in gemäßigten Klimazonen (GÖBEL, 2011; KLAUSING/ HOLPP, 2001; LILLESAND, 2015).



#### 2.4.2 X-Band (8 GHz bis 12 GHz)

Zwischen 8 und 12 GHz hat das Verhältnis der Wellenlänge zur Antennengröße einen günstigeren Wert in der Winkelauflösung. Es können mit sehr kleinen Antennen ausreichende Winkelgenauigkeiten erzielt werden.

Dieses Frequenzband wird zivil und militärisch vorwiegend für maritime Navigationsradaranlagen genutzt. Kleine billige und sich schnell drehende Antennen bieten ausreichende Reichweiten bei sehr guter Präzision. Die Antennen können als einfache Schlitzstrahler oder Patchantennen aufgebaut sein.

In militärischen Bereichen findet es als luftgestütztes Radar (engl.: „Airborne Radar“) Verwendung. Die relativ zur Wellenlänge sehr großen Antennen von Raketenleitradaranlagen gelten hierbei immer noch als handlich genug, um als verlegbar zu gelten.

In der Raumfahrt wird dieses Frequenzband für Synthetic Aperture Radar zur militärischen Aufklärung und zur geografischen Vermessung der Erdoberfläche genutzt. Durch die hohen Auflösungen kann der Satellit auch zur Beurteilung von Vegetationen dienen. Selbst Arten des Bewuchses auf der Erde und dessen Zustand ist aus den Radarbildern ableitbar. Eine Erweiterung der Funktionalität in diesem Band ist durch die Positionierung eines fast baugleichen Satelliten ermöglicht worden, der als TanDEM-X parallel, in unmittelbarer Nachbarschaft zu TerraSAR X fliegt und damit eine Höhenkartographierung der Erde in bisher nicht erreichter Genauigkeit ermöglicht. Eine spezielle Anwendung des Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) liegt in der Überwachung der Meere zur Vermeidung von Umweltverschmutzungen (GÖBEL, 2011; KLAUSING/ HOLPP, 2001; LILLESAND, 2015).

### 2.5 Natürliche, negative Effekte auf Radarsignale

**Dämpfung:** Meteorologische Effekte, wie z.B. Niederschläge können bei Wellenlängen  $< 5$  cm zu Beeinträchtigungen führen, wodurch auch Radarreichweiten beeinträchtigt werden. Man spricht hierbei von Dämpfung. Sie ist abhängig von der verwendeten Wellenlänge und dem Medium, das die Radarwelle durchquert, bzw. durch das sie gedämpft wird. Die Intensität der Dämpfung hängt neben der Radarfrequenz von der Beschaffenheit des beeinträchtigenden Mediums ab. Abbildung 9 erläutert die Zusammenhänge. Die stets in der Atmosphäre vorkommenden Moleküle wirken sich ebenfalls dämpfend auf Radarwellen aus (VOGES, 1987). Die natürlichen Minima in der Kurve der molekularen Streuung werden genutzt um dort Radaranlagen in den jeweiligen Frequenzbereichen zu betreiben. Somit wird die natürliche Dämpfung gering gehalten. In der Abbildung 9 sind dies 30 und 110 GHz für die Wasser- und Sauerstoffmoleküle.

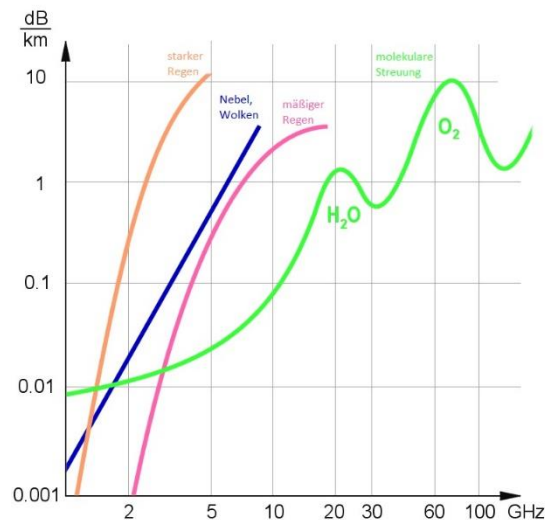


Abbildung 9: Atmosphärische Dämpfungsverluste (verändert nach [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu))

**Freiraumdämpfung:** Die Freiraumdämpfung beschreibt die Reduzierung der Leistungsdichte bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im freien Raum, also ohne Störeinflüsse von zusätzlich dämpfenden Medien (wie zum Beispiel der Luft) oder Störungen durch Reflexionen. Idealerweise ist eine Freiraumdämpfung nur im Vakuum gut messbar, beispielsweise im Weltraum oder bei Richtfunkverbindungen von und zu Satellitenpositionen. Sie ist ein wichtiges Kriterium zur Berechnung notwendiger Sendeleistungen und Empfängerempfindlichkeiten bei der Anwendung der Radargleichung (VOGES, 1987).

**Absorption:** Wird in einem Medium, bedingt durch seine Beschaffenheit, elektromagnetische Energie teilweise oder vollständig verbraucht (verschluckt), so spricht man von Absorption (Physikalisch wird die elektromagnetische Energie in eine andere Energieform, meist Wärme, umgeformt (VOGES, 1987)).

## 2.6 Seaclutter

Als Seaclutter werden Fehlechos bezeichnet, die durch das Auftreffen der Radarimpulse auf der Wasseroberfläche entstehen. Im Gegensatz zu Landzielen sind sie nicht standorttreu. Durch Wind und Strömung erhalten die Echos einen Geschwindigkeitsvektor, welcher mit einer Dopplerfrequenz verrechnet wird. Dadurch sind diese Ziele sehr schwer zu unterdrücken. In der Radarfernerkundung werden mathematische Modelle entworfen, um Fehlechos aufgrund von Seaclutter möglichst gering zu halten, was aber stets zu Lasten der Reichweiten geht.

Mit der im Radargerät eingebauten Sensitivity Time Control (STC) (manchmal auch GTC, Gain Time Control) wird das eingehende Signal im Verlauf der Empfangszeit kontinuierlich verstärkt, was eine Dynamikkompression zur Folge hat. In diesem Zusammenhang wird auch von einer Nahechodämpfung gesprochen. In der Seeschifffahrt wird die Funktion am Radargerät manuell gesteuert, an neueren Geräten auch automatisch (SKOLNIK, 2008).

## 2.7 Speckle

Als Speckle wird eine körnige Struktur in Radarbildern bezeichnet, die aufgrund der Kohärenz der Strahlung auftritt. Speckle übersetzt bedeutet so viel wie Sprengel, Tupfen oder Flecken.

Ursache für den Speckle-Effekt sind Interferenzerscheinungen: Es gibt Bildpunkte bei denen sich durch Wechselwirkungen von Radarstrahlung mit der Oberfläche die zurückgestreuten Wellen der Strahlung zufällig auslöschen und welche, bei denen sie sich überlagern (Interferenzmaxima). Diese Wechselwirkungen rufen Phasendifferenzen in den Wellen hervor.

Das führt dazu, dass ein homogenes Objekt auf der Erdoberfläche, das einheitliche Grauwerte zeigen müsste, Pixel besitzt, die heller oder dunkler sind als der durchschnittliche Grauwert.

Speckle ist im Wesentlichen eine Form von Rauschen, die die Qualität eines Radarbildes herabsetzt und die Interpretation schwieriger macht. Daher wird Speckle vor der Interpretation und Analyse des Bildes reduziert. Es gibt verschiedene Methoden ein Speckle Muster abzuschwächen (z.B. Filterung oder Multi-look processing), jedoch bedeutet das immer einen gewissen Informationsverlust (SKOLNIK, 2008).

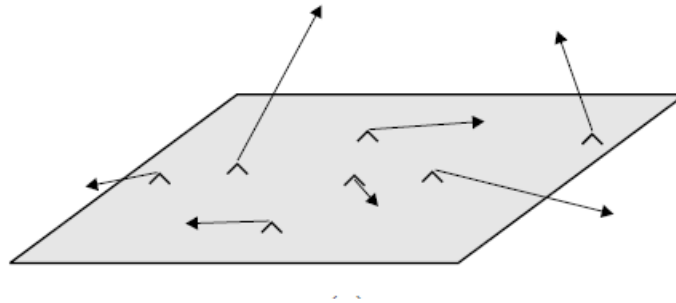


Abbildung 10: Speckle. Rückstrahlung an Wellen, vektoriell dargestellt (Skolnik, 2008)

### 3 Synthetic Aperture Radar

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den wesentlichen Grundlagen des SAR und dessen Abbildungseigenschaften. Angefangen mit einem geschichtlichen Verlauf (Abschnitt 3.1), über die Beschreibung des Grundprinzips abbildender Radarsysteme (Abschnitt 3.2). Zum leichteren Verständnis werden Vergleiche mit RAR- Systemen gezogen.

#### 3.1 Entwicklung der Radarfernerkundung

Im Jahre 1886 gelang es Heinrich Hertz die Theorie von James Clerk Maxwell zu bestätigen, welche besagt, dass elektromagnetische Wellen mit festen Körpern interferieren und diese auch zum Teil reflektieren. Diese Entdeckung machte sich 1904 der deutsche Ingenieur Christian Hülsmeier zu Nutze, indem er das erste funktionierende Radarsystem baute und patentieren ließ. Die Reichweite seines Systems war damals noch auf drei Kilometer begrenzt (KAISERLICHES PATENTAMT, 1905; TRENKLE, 1986; SCHREIER, 1995).

In den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde schließlich der militärische Nutzen von Radarsystemen erkannt, was die Forschung und Entwicklung dahingehend intensivierte. Vor allem England, Deutschland und die USA waren in der neuen Technologie führend. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden dann die ersten räumlich hochauflösenden Radarsysteme entwickelt, welche als sogenannte Seitensichtradarssysteme (SLAR, Side Looking Airborne Radar), auf Flugzeuge montiert, zum Einsatz kamen (ULABY et al., 1986).

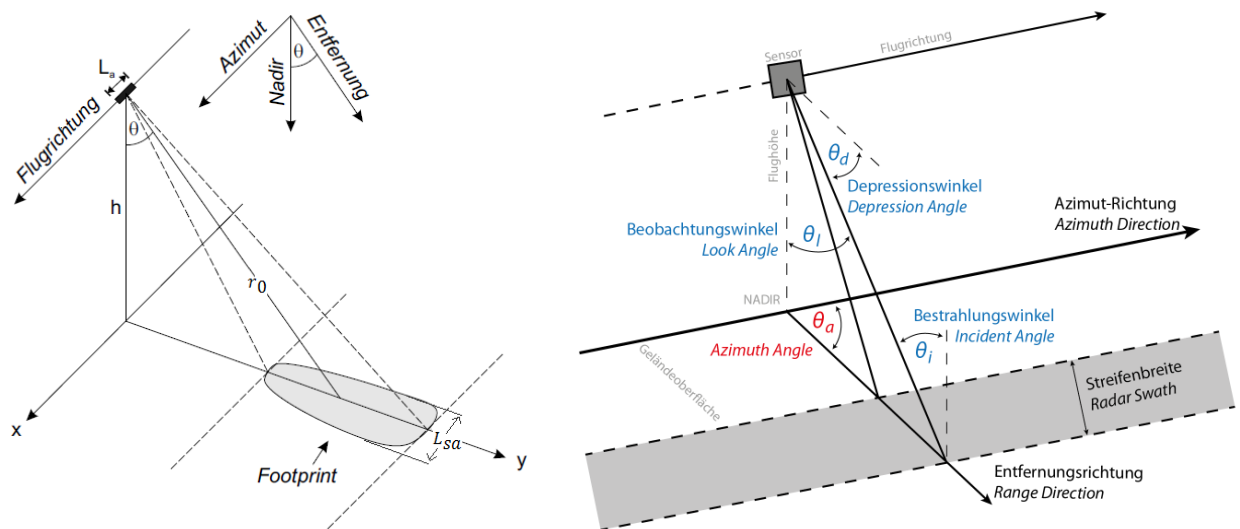
Die erste Patentschrift für das Abbildungsradarsystem mit realer Apertur (RAR, Real Apertur Radar) stammt von dem amerikanischen Mathematiker und Ingenieur Carl A. Wiley, welche 1951 mit dem Titel *Pulsed Doppler Radar Methods and Means*, veröffentlicht wurde. Kurz darauf wurde das System der synthetischen Apertur entwickelt, welches sich durch bestimmte Methoden in der Signalverarbeitung auszeichnet (SKOLNIK, 2008).

Der erste Nutzer des neuen Systems war die NASA, die den ersten Erdbeobachtungssatellit SEASAT im Juni des Jahres 1978 ins All schießen konnte. Seine Aufgabe war die Fernerkundung der Meere mit seinem Hauptinstrument, einem Synthetic Aperture Radar, welches im L- Band mit einer Wellenlänge von 23,5 cm arbeitete. Trotz des kurzen Einsatzzeitraums von nur 105 Tagen wurde schnell das Potential zur Erfassung von Landaufnahmen erkannt. Seitdem folgten ähnliche Programme, bei denen Radarsatelliten zum Erkunden der Erdoberfläche in die Umlaufbahnen geschossen wurden (NASA, 2016).

#### 3.2 Grundlagen SAR

Bildgebende Radarsysteme, wie RAR oder SAR, ermöglichen zweidimensionale Abbildungen des überflogenen Gebietes. Hierfür sendet die Radarantenne kurze, kohärente Mikrowellen senkrecht zur Flugrichtung schräg nach unten ab. Der dadurch beleuchtete Bereich wird „Footprint“ genannt. Aufgrund der Tatsache, dass die Systeme schräg zur Seite abstrahlen, werden sie auch als Seitensichtradare bezeichnet. Für abbildende Radarsysteme ist die Seitensicht eine notwendige Voraussetzung, da zur räumlichen Trennung der Signale die Laufzeit verwendet wird. Benachbarte

Bodenpunkte in der Nähe des Nadirs können nicht aufgelöst werden, weil sie die gleiche Laufzeit haben. Die Abstrahlcharakteristik der Antenne ermöglicht, dass die ausgesendeten Impulse nicht in alle Richtungen gleichmäßig ausgesendet werden, sondern gebündelt den Bereich des Footprints beleuchten. Die Bündelung, in Verbindung mit dem Wirkungsgrad der Antenne, bewirkt eine Verbesserung der Energieausbeute, die als Antennengewinn bezeichnet wird. Die zurückgeworfenen Impulse werden von der Antenne aufgefangen und verarbeitet. Betrachtet man die empfangenen Reflexe des Radarsignals, so gilt auch hier, dass man daraus Informationen über die Rauigkeit, geometrische Struktur und elektrische Eigenschaften der Oberfläche gewinnen kann. Es können Land- von Wassermassen und Felder mit unterschiedlichen Bewüchsen voneinander unterschieden werden. Im Bereich der Meeresforschung können Aussagen über Meeresströmungen, Windrichtungen, Meereis erkundung, Verschmutzungen und Küstenlinienverläufe getroffen werden (ALBERTZ 2009; KLAUSING/ HOLPP 2000).



**Abbildung 11: Links: Darstellung der Radargeometrie mit Azimut, Nadir und Entfernung. Rechts: Darstellung der Winkelgeometrie (verändert nach Wessel, 2006)**

Der Einfallswinkel  $\Theta$ , der definiert ist als der Winkel zwischen Nadir- und Entfernungsrichtung, lässt sich stets in einem gewissen Rahmen variieren. Die eingezeichnete Höhe  $h$  ist die Flughöhe der Plattform über der Erdoberfläche und  $L_a$  die Länge der Radarantenne, welche auch als Apertur bezeichnet wird.

Aufgenommene Bilder werden in zwei Dimensionen unterteilt. Die Dimension in Flugrichtung wird Azimut genannt und die andere als Entfernung oder Range betitelt. Eine weitere wichtige Größe ist der Bestrahlungswinkel oder Incidentangle. Er beschreibt den Winkel, mit dem die Radarwellen auf die Erde treffen. Ist der Winkel zu groß wird die Aufnahme zu flach, sodass hintereinander liegende Ziele möglicherweise von den vorherigen abgedeckt werden. Bei einem zu kleinen Winkel können -wie oben beschrieben- die Laufzeiten nicht voneinander getrennt werden. Er gibt somit auch eine Qualitätsangabe der Aufnahme an, wobei der  $45^\circ$  Winkel das Optimum darstellt (WESSEL, 2006).

Eine synthetische Apertur ist eine unbedingte Voraussetzung für den Einsatz von Radar aus dem Weltall, da mit einer realen Apertur keine entsprechenden geometrischen Auflösungen erzielt werden können.

### 3.3 Auflösung in Azimut

Möchte man bei einem Radar mit realer Apertur die Azimutalauflösung bestimmen, muss die Wellenlänge durch die Länge der Apertur dividiert werden. Dabei ist die Auflösung üblicherweise als Winkel definiert und gleich dem Öffnungswinkel (Antennenkeule) der Antenne  $\theta_a$ . Hierbei darf die Signalleistung der Hauptkeule höchstens um 3 dB vom Maximalwert abfallen (KRAUS und SCHNEIDER, 1988). Eine Apertur der Länge  $d_a$  hat näherungsweise einen Öffnungswinkel von:

$$\theta_a \approx \frac{\lambda[m]}{d_a[m]}$$

**Formel 9: Winkelauflösung einer realen Apertur (aus Klausing/ Holpp, 2000)**

Ergo kann sich die Auflösung nur durch verkleinern der Wellenlänge oder aber durch verlängern der Antenne verbessern.

Vergleicht man die Winkelauflösung  $\theta_{sa}$  einer synthetischen Apertur mit der einer realen Apertur, fällt auf, dass die Länge der Apertur  $l_{sa}$  mit dem Faktor zwei berechnet wird.

$$\theta_{sa} = \frac{\lambda[m]}{2 \times l_{sa}[m]}$$

**Formel 10: Winkelauflösung einer synthetischen Apertur (aus Klausing/ Holpp, 2000)**

Der Faktor zwei entsteht bei der synthetischen Apertur dadurch, dass durch die asynchrone Abstrahlung der Pulse, sowohl auf dem Hinweg zum Ziel, als auch auf dem Reflexionsweg, zwei verschiedene Phasenunterschiede gemessen werden können (MOREIRA, 2001). Auf dem Flugweg werden in kurzen Abständen gepulste Signale abgestrahlt (PRF, Pulse Repetition Frequency). Sie werden in einer so kurzen Folge abgestrahlt, dass das Ziel nahezu kontinuierlich beleuchtet wird. Die synthetische Apertur entsteht somit erst nach der Aufnahmezeit, durch rechnerische Aneinanderreihung der einzelnen physisch vorhandenen Antennenlänge über den Flugweg (KLAUSING/ HOLPP, 2000). Das beleuchtete Objekt wird also nicht aus *einer*, sondern aus allen Bildern berechnet, die durch die Pulse entstehen so lange sich das Objekt im Footprint befindet.

$$L_{sa} = \theta_a \times r_0 = \frac{\lambda}{d_a} \times r_0$$

**Formel 11: Länge der synthetischen Apertur (aus Klausing/ Holpp, 2000)**

Die maximale Auflösung der synthetischen Apertur  $\delta_{sa}$  ist das Produkt der maximalen Winkelauflösung mit der Entfernung  $r_0$  und ergibt sich zu:

$$\delta_{sa} = \frac{d_a}{2}$$

**Formel 12: max. Auflösung synthetische Apertur (aus Klausing/ Holpp, 2000)**

Somit ist die azimutale Auflösung nur noch von der Länge der Antenne abhängig und nicht mehr wie beim RAR auch vom Abstand.

### 3.4 Auflösung in Range

Das Auflösen zweier Objektpunkte in Entfernungsrichtung unterliegt bei beiden Systemen (SAR und RAR), im Wesentlichen denselben Gesetzen. Sie ist abhängig von der Pulsdauer  $\tau_p$  und der Signalbandbreite  $B$ . Durch das umgekehrt proportionale Verhältnis der Bandbreite zur Impulsdauer entspricht die höhere Bandbreite einer kürzeren Impulsdauer (DETLEFSEN, 1989).

$$\delta_r = \frac{c_0 \times \tau_p}{2} = \frac{c_0}{2 \times B}$$

Formel 13: Entferrungsauflösung (aus Klausing/ Holpp, 2000)

Die Bedingung um zwei hintereinander liegende Objekte aufzulösen ist, dass beide Signale räumlich voneinander trennbar sein müssen. Dazu müssen sich ihre Laufzeiten mindestens um die Länge der Impulsdauer voneinander unterscheiden. Eine Erhöhung der Auflösung in Entfernung ist also nur über eine kürzere Impulsdauer zu realisieren. Technisch ist es jedoch schwierig den Impuls beliebig zu verkürzen, da bei einer Verkürzung der Impulsdauer die Höhe der zu sendenden Energie ansteigt. Die Höhe der Energie ist aber durch die baulichen Gegebenheiten des Satelliten begrenzt. Aus diesem Grund wird bei modernen SAR-Systemen ein Pulscompressionsverfahren genutzt. Anstatt eines kurzen Impulses wird ein Impuls so mit einer Frequenz moduliert, dass die Bandbreite des sich ergebenden Signals erhöht wird. Dieses so veränderte Signal, dessen Frequenz sich mit der Zeit ändert, wird als Chirp bezeichnet (GÖBEL, 2011).

### 3.5 Bildgeometrie und Bilddarstellung

Die von der Geländeoberfläche zurückgestreuten Echos (Amplituden und Phasen der gestreuten Wellen) werden in einer Rohdatenmatrix gespeichert. Aus den aufgenommenen, komplexen Signalen wird eine zweidimensionale Abbildung der Oberfläche generiert. Die orthogonalen Bildkoordinatenachsen sind die in Flugrichtung verlaufende Azimut-Achse und die senkrecht zur Flugrichtung in Blickrichtung verlaufende Entfernungs-Achse. SAR- Bilddaten sind aufgrund der Schrägsicht und der Erdkrümmung aber geometrisch verzerrt. Dieser Fehler wird bei der Verarbeitung der Bilder korrigiert, indem man sie in die Grundrissgeometrie überführt. Somit bleiben die geometrischen Eigenschaften weitestgehend erhalten. Bei der Auswertung der entstandenen Bilder ist es wichtig darauf zu achten, ob der Satellit ascending, also aufgehend oder descending, untergehend aufgenommen hat. Ein Beispiel für aufgehend wäre z.B. wenn der Satellit über dem Äquator steht und Richtung Nordpol fliegt. Als Beobachter auf der Nordhalbkugel wäre dieses somit ein Aufgang. Dies hat Einfluss auf die Auswertung der Bilder, da die Aufnahme descending, also wenn die Flugrichtung vom Pol zum Äquator verlief, in Relation zur üblichen Darstellung (Norden oben), auf dem Kopf steht und die Georeferenzen erst richtig herum eingelesen werden müssen. Weitere abbildungsgeometrische Besonderheiten, die der Korrektur bedürfen sind z.B. Foreshortening (Perspektivische Verkürzung), Layover (Überlappung) und Schattenwurf. Diese spielen aber im maritimen Bereich eher eine kleine Rolle (BAMLER und SCHÄTTLER, 1993; MOREIRA, 2001).

Die radiometrischen Eigenschaften im Bild lassen sich bei SAR-Bilddaten relativ zuverlässig aus den physikalischen Eigenschaften des Objektmodells ableiten. Denn die Radiometrie hängt im Wesentlichen von den physikalischen Parametern Oberflächenrauigkeit, Dielektrizitätskonstante und verwendeter Wellenlänge ab. Daher kann über die Art und Intensität der Rückstreuung auf die Radiometrie geschlossen werden. Für Wasser (still) ergibt sich aufgrund seiner relativ glatten Oberfläche im

Verhältnis zur Wellenlänge eine spiegelnde Reflexion (vgl. Abb 12). Somit kommt der überwiegende Teil der Strahlung nicht zum Sensor zurück. Wasser erscheint daher im Allgemeinen als dunkle Fläche. Dieses Verhalten trifft für alle in der Radarfernerkundung gängigen Wellenlängenbereiche zu (ALBERTZ, 2009; SKOLNIK, 2008). Solche Effekte lassen sich dann zusätzlich durch Fehlfarbenkodierung für eine bessere Übersichtlichkeit nutzen.

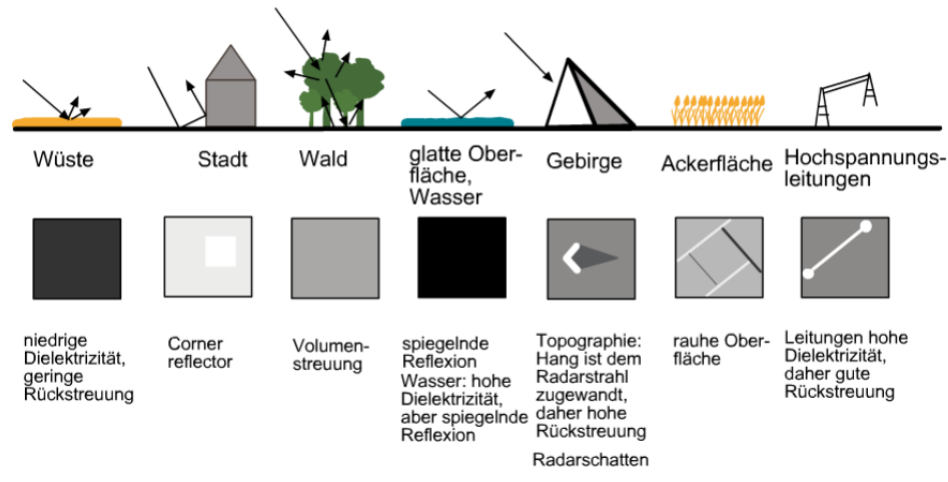


Abbildung 12: Abbildung verschiedener Oberflächen mit SAR (verändert nach <https://earth.esa.int>)

### 3.6 Produkt- ID Bezeichnung von TerraSAR-X und Sentinel 1

Jedes aufgenommene Bild wird mit einer Produkt ID versehen, um es eindeutig identifizieren zu können. Jede Produkt- ID, abhängig vom System, ist ähnlich aufgebaut. Die Produkt- ID's von TerraSAR-X und TanDEM-X werden folgendermaßen aufgebaut, wobei jede Information von der vorhergehenden mit einem Unterstrich getrennt ist. Am folgenden Beispiel können folgende Informationen ausgelesen werden:

**TSX1\_SAR\_\_MGD\_SE\_\_SM\_S\_SRA\_20160424T171049\_20160424T171053**

**TSX1:** Bezeichnung des Systems mit denen die Aufnahmen gemacht wurden. Je nach Satellit TS-X oder TD-X.

**SAR:** Die Aufnahmemethode Synthetic Aperture Radar.

**MGD:** Multi Look Ground Range Detected. Sagt aus, d

**SE:** Auflösungsmodus: Es wird unterschieden zwischen Spatially Enhanced Product (SE) und Radiometrically Enhanced Product (RE). Der Modus RE wurde für Radiometrische Aufnahmen optimiert. SE wird für möglichst hohe Bodenauflösung gewählt.

**SM:** Der Aufnahmemodus. In diesem Fall wurde der Modus Stripmap gewählt (Siehe auch 4.3).

**S:** Singlepol (HH oder VV), D wäre Dualpol (HH/HV oder VH/VV oder HH/VV)

**SRA:** Antenna Receive Configuration: SRA: for single-receive antenna, DRA for dual-receive antenna.



**Datum und Uhrzeit:** Die folgenden Ziffern ergeben rückwärts gelesen das Datum und vorwärts gelesen die Dauer der Belichtung. In dem Beispiel also von 17:10:49 Uhr bis 17:10:53 Uhr UTC, was 4 Sekunden Belichtung der Szene bedeutet. Der Buchstabe „T“ trennt Datum und Zeit.

Szenen des Sentinel 1- Systems werden ähnlich, jedoch etwas umfangreicher verschlüsselt. Wie bei TerraSAR- und TanDEM-X sind die unterschiedlichen Informationen mit einem Unterstrich getrennt (<https://earth.esa.int>).

**S1A\_EW\_GRDM\_1SDH\_20160511T170858\_20160511T171002\_011214\_010F30\_5EE4**

**S1A:** Systembezeichnung. Die Bilder wurden mit dem Satelliten Sentinel 1a gemacht.

**EW/ IW:** Verschlüsselung des Aufnahmemodus. EW steht für Extra Wide Swath, IW steht für Interferometric Wide Swath (Siehe auch 4.3).

**GRDM:** Produkttyp: GRD steht für *Ground Range Detected*. Es ist ein Aufnahme- und Rechenverfahren, das in den Modi FR (Full Resolution), MR (Medium Resolution) und HR (High Resolution) zur Verfügung steht. Das Verfahren liefert über die Zuordnung der Ziele als Projektion des lateralen Richtungsvektors auf ein ellipsoides Erdmodell bessere Detektierbarkeit über Unterdrückung von Hintergrundrauschen (Speckle). Allerdings wird auch das Auflösungsvermögen dadurch etwas schlechter.

**1SDH:** Produktklasse: S= Standard. DH steht für die Polarisation. In diesem Fall wird die duale Polarisation für HH und HV beschrieben.

**Datum und Uhrzeit:** Wie bei TSX ergeben die folgenden Ziffern rückwärts gelesen das Datum und vorwärts gelesen den Zeitraum der Belichtung. In diesem Beispiel vier Sekunden.

**Orbitnummer:** Die nächsten sechs Ziffern beschreiben die absolute Orbitnummer, die zwischen 000001 und 999999 liegen kann.

**Missions- ID:** Die Missions- ID dient der eindeutigen Identifizierung der Mission und kann zwischen 000001 und FFFFFFFF liegen.

**Produkt- ID:** Die weitere hexadezimal generierte Zeichenfolge dient der eindeutigen Identifizierung der Aufnahme.

## 4 Die Satelliten

Für die Versuche wurden zwei Satellitensysteme genutzt. Das erste Paar waren die Schwestersatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X, welche sich durch hohe Auflösung im X- Band auszeichnen. Das zweite Paar waren die Satelliten Sentinel 1a und Sentinel 1b, beide arbeiten im C- Band. Die unterschiedlichen Systeme sind folgend genauer beschrieben.

### 4.1 TerraSAR-X/ TanDEM-X

TerraSAR-X und TanDEM-X sind deutsche Erdbeobachtungssatelliten, welche im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie realisiert werden. TS-X ist der erste deutsche Satellit, der im Rahmen eines so genannten Public Private Partnerships (PPP) zwischen DLR und Airbus Defence and Space (vormals Astrium) realisiert wurde. Die Nutzung der TS-X/ TD-X -Daten für wissenschaftliche Zwecke liegt in der Zuständigkeit des DLR, das auch die Konzeption und Durchführung der Mission sowie die Satellitensteuerung übernimmt.

TerraSAR-X hat am 7. Januar 2008 den operationellen Betrieb aufgenommen. TanDEM-X den Betrieb am 21.06.2010. Beide Satelliten tragen als primäre Nutzlast ein Synthetic Aperture Radar, das in verschiedenen Modi betrieben wird. Die damit gemachten Aufnahmen können mit unterschiedlichen Streifenbreiten, Auflösungen und Polarisationen variiert werden. Die Antenne kann die Radarkeule senkrecht zur Flugrichtung in einem Schwenkbereich zwischen 20 und 60 Grad elektrisch verstellen, ohne den Satelliten zu bewegen. Dadurch ist es möglich mehrere Ziele aus derselben Flugbahn anzupeilen. Die Ziele der Mission sind die Bereitstellung von SAR- Daten im X-Band für Forschung und Entwicklung sowie für wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen.

Der Orbit für beide Satelliten wiederholen sich nach 11 Tagen. Dies entspricht 167 Orbits bis sie wieder an der gleichen Stelle stehen. Die Orbithöhe beträgt 514.8 km und die Inklination 97.45 Grad. Ein Radar ist auf die Beleuchtung der Erdoberfläche nicht angewiesen, aber ein sonnensynchroner Orbit vereinfacht den Aufbau des Satelliten, da er sich permanent an der Grenze der Tag/Nachtseite bewegt und damit dauernd im Sonnenlicht steht. Die Batterien entladen sich dadurch nur relativ selten (es kommt aber trotzdem einige Male pro Jahr zur Abdeckung durch die Erde), jedoch nicht bei jedem Orbit. Zwei Galliumarsenid Solarpanels mit einer Fläche von 5.25 m<sup>2</sup> liefern den Strom für die Satelliten. Eine Antenne an einem 3.3 m langen Ausleger überträgt die Daten zur Erde. Dies geschieht im X-Band mit 300 MBit/s (Abb. 21). Eine Besonderheit der beiden Satelliten besteht darin, dass sie sich in einer Art Helixformation umkreisen und so nur wenige hundert Meter voneinander entfernt sind. Dieser Faktor ermöglicht auch das sogenannte Stereosehen, mit dem Höhenmodelle der Erdoberfläche abgebildet werden können (Abb. 23).

Kommandos werden von der Bodenstation in Weilheim gesandt, die Daten selbst werden von einer Bodenstation in, u.a. Neustrelitz empfangen. Kommandos wie auch Daten zum Boden werden verschlüsselt gesendet um einen Missbrauch auszuschließen (DLR Broschüre/ DLR Homepage).

	<b>TerraSAR-X</b>	<b>TanDEM-X</b>
Länge	4,88 m	5,0 m
Durchmesser	2,4 m	2,4 m
Startgewicht	1230 kg	1330 kg
Radarfrequenz	9,65 GHz	9,65 GHz
Wellenlänge	3,1 cm	3,1 cm
Bandbreite	5– 150 MHz (300 MHz experimentell)	5– 150 MHz (300 MHz experimentell)
Pulse Repetition Frequency (PRF)	2,0 kHz- 6,5 kHz	2,0 kHz- 6,5 kHz
Antennengröße	4,78 m x 0,7 m	4,78 m x 0,7 m
Energieverbrauch	800 Watt (gemittelt)	730 Watt (gemittelt)
Einfallswinkel StripMap,ScanSAR	20°- 45° volle Leistung (15°- 60° möglich)	20°- 45° volle Leistung (15°- 60° möglich)
Einfallswinkel Spotlight	20°- 55° volle Leistung (15°- 60° möglich)	20°- 55° volle Leistung (15°- 60° möglich)
Auflösung	1 m, 3 m, 16 m (abhängig von der Bildgröße)	1 m, 3 m, 16 m (abhängig von der Bildgröße)
Schwadbreite <sup>3</sup>	10 km, 30 km, 100 km (abhängig von der Auflösung)	10 km, 30 km, 100 km (abhängig von der Auflösung)
Polarisation	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH
Trägerrakete	Dnepr 1 (ehemals SS- 18)	Dnepr 1 (ehemals SS- 18)
Start	15.06.2007, 02:14 UTC	21.06.2010, 02:14 UTC
Startplatz	Baikonur, Kasachstan	Baikonur, Kasachstan
Höhe der Umlaufbahn	514 km	514 km
Neigungswinkel gegen den Äquator	97,44°, sonnensynchron <sup>4</sup>	97,44°, sonnensynchron
Repeat Period	11 Tage	11 Tage
Blickrichtung	Rechts (links auf Anfrage)	Rechts (links auf Anfrage)
Lebensdauer	Mind. 5 Jahre	Mind. 5,5 Jahre
Satellitenkommandierung	DLR Bodenstation Weilheim	DLR Bodenstation Weilheim
Datenempfang Maritim	Neustrelitz, O´Higgins, Svalbard	Neustrelitz, O´Higgins, Svalbard
Missionsbetrieb	DLR Oberpfaffenhofen	DLR Oberpfaffenhofen

**Tabelle 2: TerraSAR-X Daten tabellarisch(eigene Darstellung)**

<sup>3</sup> Als Schwadbreite wird in der Fernerkundung der Aufnahmestreifen des Satelliten bezeichnet.

<sup>4</sup> Als sonnensynchronen Orbit bezeichnet man eine Umlaufbahn um einen Planeten, deren Orbitalebene die gleiche Rotationsänderung erfährt, wie die des umkreisten Planeten um die Sonne.

Inzwischen ist ein Nachfolgesystem TerraSAR-NG/ HRWS in Planung, das den Satelliten zum Ende seiner Lebensdauer ersetzen soll. Dieses Nachfolgesystem soll dabei allein aus Mitteln der Industrie, den mit TerraSAR-X erzielten Gewinnen finanziert werden. Ebenso das System TanDEM- L, welches zur systematischen Beobachtung von dynamischen Prozessen entworfen wird. Sein Aufgabenbereich umfasst das Bilden von Datensätzen in den Bereichen Klima- und Umweltforschung, Geodynamik, Hydrologie und Ozeanographie, zur Bestimmung globaler Waldhöhen und Biomassen, Vermessung plattentektonischer Prozesse der Erdkruste, von Eis- und Gletscherbewegungen und Meeresströmungen (DLR Broschüre, 2009).

### 4.2 Sentinel 1 a/b

Sentinel 1 ist der erste Satellit des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernikus. Die Mission wurde aufgebaut, um die wissenschaftlichen Missionen ERS-1, ERS-2 und ENVISAT-ASAR fortzusetzen. Zur Zeit sind die beiden Schwestersatelliten Sentinel 1a und b des Programms im All. Sie wurden von der europäischen Weltraumorganisation ESA, in Zusammenarbeit mit der Europäischen Union entworfen und werden auch von diesen unterhalten. Der Missionsbetrieb wird von der ESA sichergestellt.

Sein Aufgabenspektrum umfasst das Erkennung von Schiffen und Ölverschmutzungen sowie Ableitung von Wind-, Seegangs- und Eisparametern aber auch das Untersuchen von sicherheitstechnischen Aspekten gehören zum Aufgabenfeld. Die empfangenen Daten sind öffentlich einsehbar und gelten primär für Forschung und Entwicklung sowie für wissenschaftliche und kommerzielle Zwecke.

Ähnlich wie bei TS-X/ TD-X trägt er als Nutzlast einen Radarsensor, der in verschiedenen Modi betrieben werden kann. Jedoch wird Sentinel in einem anderen Frequenzband (C- Band) betrieben und unterstützt Dual- Polarisation. Mit seinen zwei Solarpanelen (2x10m), die gemittelt 5900 Watt liefern, wird eine kontinuierliche Beobachtung der Erdoberfläche sichergestellt.

Den operationellen Betrieb hat Sentinel 1a am 23.09.2014 aufgenommen. Er fliegt in einem sonnensynchronen Orbit bei einem Wiederholungszyklus von 12 Tagen. Beide Satelliten (a und b) teilen sich denselben, polaren Orbit, sind jedoch um 180° zueinander versetzt. Somit verringert sich Wiederholungszyklus auf nur noch sechs Tage.

Der Downlink der Daten erfolgt über eine neue Kommunikationstechnik, das optische Laser Communication Terminal (LCT). Mit dem LCT ist es möglich, sehr viel höhere Datenmengen als bislang ohne Zeitverzug aus dem Weltraum zur Erde zu senden. Dabei ist die Übertragungskapazität rund dreimal höher als bei vergleichbaren Systemen. Weiterhin wurde mit dem neuen Datenrelaissystem die Übertragungsdauer von zehn auf 45 Minuten erhöht ([www.dlr.de](http://www.dlr.de)).

	<b>Sentinel 1a</b>	<b>Sentinel 1b</b>
Länge	3,9 m x 2,6 m x 2,5 m	3,9 m x 2,6 m x 2,5 m
Startgewicht	2300 kg	2300 kg
Radarfrequenz	5,405 GHz	5,405 GHz
Wellenlänge	6,0 cm	6,0 cm
Antennengröße	12,30 m x 0,90 m	12,30 m x 0,90 m
Energieverbrauch	5900 Watt	5900 Watt
Auflösung	25 m, 100 m, 800 m	25 m, 100 m, 800 m
Schwadbreite	80 km, 250 km, 400 km	80 km, 250 km, 400 km
Polarisation	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH
Trägerrakete	Sojus 2.1b	Sojus 2.1b
Start	3. April 2014, 21:02 UTC	25. April 2016, 21:26 UTC
Startplatz	Französisch Guyana	Französisch Guyana
Höhe der Umlaufbahn	693 km	693 km
Neigungswinkel gegen den Äquator	98,18°, sonnensynchron	98,18°, sonnensynchron
Repeat Period	12 Tage	12 Tage
Lebensdauer	Mind. 7 Jahre	Mind. 7 Jahre
Datenempfang	Kiruna, Svalbard, Matera, Maspalomas, Inuvik	Kiruna, Svalbard, Matera, Maspalomas, Inuvik
Missionsbetrieb	ESA Darmstadt	ESA Darmstadt

**Tabelle 3: Sentinel 1 Daten tabellarisch (eigene Darstellung)**

In Zukunft wird die Baureihe noch durch die Satelliten c und d verstärkt werden, um so eine kontinuierliche Abdeckung zu erzielen. Die Copernikus- Programm ist nicht nur auf das System Sentinel 1 beschränkt, sondern umfasst auch die Satelliten Sentinel 2 bis 5, wobei ein Teil bereits realisiert wurde und ein anderer Teil noch in Planung ist. Ein aktuelles Beispiel ist der erfolgreiche Start von Sentinel 2b am 07.03.2017 um 01:49 UTC. Diese Systeme unterscheiden sich im Wesentlichen von ihren Aufgabenbereichen und der Art ihres Hauptinstruments, dass für die jeweilige Mission eingesetzt wird.

## 4.3 Aufnahmemodi

Der Aufnahmemodus einer SAR- Aufnahme bestimmt die Größe und Qualität eines gemachten Bildes. Hierbei gilt je größer das Bild, desto schlechter ist die Qualität hinsichtlich der Auflösung. Verschiedene Modi sind nachfolgend dem jeweiligen Satellitensystem entsprechend aufgeführt.

### 4.3.1 TerraSAR X/ TanDEM X

#### SL (Spotlight Mode)

SL ist der Modus, in dem die höchste geometrische Auflösung geboten wird. Demzufolge ist auch der observierte Bereich (Footprint) kleiner als in den anderen Modi. Er beträgt nur 10 x 10 km bei einer Auflösung von 1,7 m. Während der Aufnahme wird die Antenne auf den zu beobachtenden Bereich gerichtet und nachgeführt, sodass der Interessenbereich länger beleuchtet wird und somit die Synthetische Apertur länger wird. Der maximale Steuerungswinkel in Azimut beträgt hierbei  $\pm 0,75^\circ$ . Bei Reduzierung der geometrischen Auflösung kann die Aufnahme in Azimutrichtung gestreckt werden.

Unter Spotlight Mode fällt auch die Funktion des High Resolution Spotlight (HS), bzw. des Staring Spotlight, bei der die Auflösung noch etwas höher ist.

#### SM (StripMap Mode)

Der SM Mode ist der Basic Mode für SAR- Systeme. Dabei wird der Schwadpfad von einer gleichmäßigen Serie von Radarpulsen beleuchtet. Die Antenne ist dabei in Elevation und Azimut fixiert. Das Ergebnis ist ein beleuchteter Streifen mit gleichbleibender Qualität in Azimutrichtung. Die Standardszenengröße beträgt hier 30 x 50 km, bei einer Auflösung von 3 m.

#### SC (ScanSAR Mode)

Beim SC Modus wird eine große Abdeckung erzielt. Der mindestens 100 km breite Schwadpfad wird durch mehrere, gleichzeitige Scans, mit unterschiedlichen Einfallswinkeln erstellt. Die Einzelaufnahmen werden dann zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Aufgrund der reduzierten Bandbreite in Azimutrichtung, ist die Auflösung in Azimut geringer als im StripMap Modus.

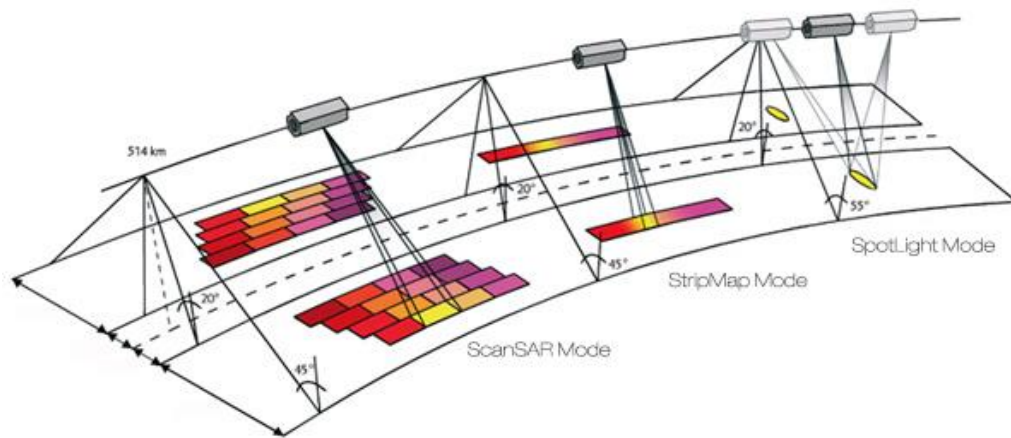


Abbildung 13: Aufnahmemodi TerraSAR-X (<http://www.intelligence-airbusds.com>)

Mode	HS	SL	SM	SC
<b>Max. Auflösung</b>	1,1x1,1 m	1,7x1,7 m	3x3 m	18,5x18,5 m
<b>Szenenbreite (Range x Azimut)</b>	10 km x 5 km	10 km x 10 km	30 km x 50 km	100 km x 150 km

Tabelle 4: Azimutauflösung und Szenenbreite der TerraSAR-X Aufnahmemodi (eigene Darstellung)

Die Szenenbreite in Azimutrichtung der Modi SM und SC ist hier die Standardgröße. Sie kann bis 1650 km verlängert werden.

#### 4.3.2 Sentinel 1

Im Gegensatz zu TS-X werden die Aufnahmen bei Sentinel 1 unter dem Stichwort Data Processing kategorisiert. Alle Aufnahmen werden in die Kategorien Level 0 bis Level 2 unterschieden. Die empfangenen Rohdaten werden unter der Kategorie Level 0 geführt. Sie sind die Basis für das weitere Verarbeiten in die nächsten Kategorien Level 1 und 2. Bereits verarbeitete Produkte, welche über Land aufgenommen sind, werden als Level 1- Produkte bezeichnet (GRD Ground Range Detected). Die in der Arbeit verwendeten Produkte entstammen alle aus der Kategorie Level 1, welche auch über Wasser angewendet werden können. GRD- Produkte können unterschiedlich hoch aufgelöst werden (siehe Tab. 5). Level 2- Produkte werden unter dem Namen OCN (Ocean) geführt, welche speziell für Aufnahmen über Wassermassen konzipiert wurde. Dazu gehören unter anderem die Erstellung eines zweidimensionalen Oberflächenmodells und eine Windmessung in 10 m Höhe (<https://ec.europa.eu>). Die Aufnahmemodi werden folgend erläutert.

##### SM (StripMap Mode)

Im SM Mode, ähnlich wie bei TerraSAR-X wird der Schwadpfad mit fixierter Antenne und gleichmäßigen Serien von Pulsen beleuchtet. Der so entstehende Pfad ist 80 km breit. Der Stripmap Mode kann mit einem von sechs vordefinierten Blickwinkeln arbeiten. Die Qualität der Aufnahmen ist gleichbleibend in Azimutrichtung.

##### IW (Interferometric Wide Swath)

Der IW Mode ist der am Häufigsten eingesetzte Modus beim Sentinel 1- System. Der 250 km breite Schwadpfad wird dabei in drei kleinere Unterpfade geteilt. Mit der relativ neuen TOPSAR<sup>5</sup>- Technik kann der Satellit die Antenne einmal nach oben und unten (Rangerichtung) sowie nach vorne und hinten schwenken (Azimutrichtung). Das hat zur Folge, dass Gebiete nicht doppelt beleuchtet werden und die Qualität der Aufnahmen gleichmäßiger ist. Die TOPSAR- Technologie wird auch im EW- Modus genutzt.

##### EW (Extra Wide Swath)

Im EW- Mode ist der Schwadpfad 400 km breit. Ähnlich wie im IW- Mode wird der Pfad in Unterpfade geteilt, im EW- Mode jedoch in fünf. Mit der TOPSAR- Technik wird für gleichbleibende Qualität gesorgt.

<sup>5</sup> Terrain Observation with Progressive Scans SAR

## WV (Wave Mode)

Im WV Mode macht der Satellit einzelne Bilder in Größen von 20x20 km. Die dabei entstehenden Bilder werden mit einem Einfallswinkel zwischen 23° und 36,5° gemacht. Das jeweils nächste Bild hat immer einen Abstand von 100 km zum vorherigen, Bilder mit dem gleichen Einfallswinkel sogar 200 km zum vorherigen. Das so entstehende Muster hat Ähnlichkeit zu einer Welle. Die verschiedenen Aufnahmefelder sind entweder HH oder VV polarisiert und für jedes Aufnahmefeld wird ein eigener Datensatz angelegt.

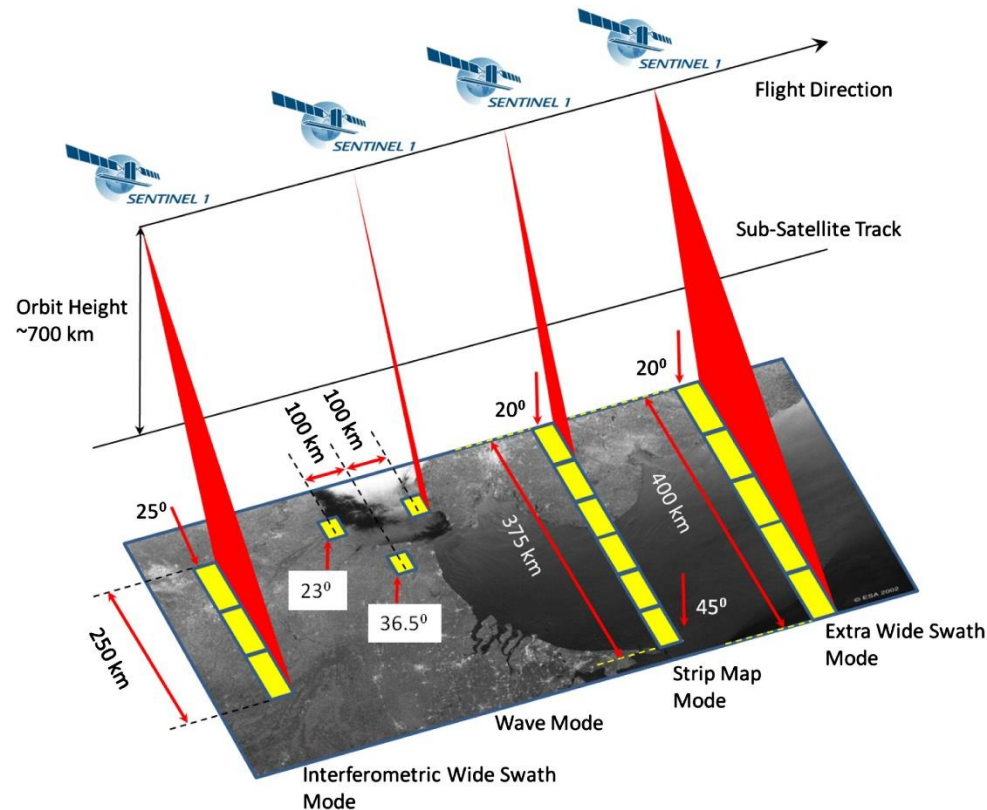


Abbildung 14: Aufnahmemodi Sentinel 1 (<https://sentinel.esa.int>)

Mode	SM	IW	EW	WV
Max. Auflösung Medium	84x84 m	88x87 m	93x87 m	52x51 m
Max. Auflösung High	23x23 m	20x22 m	50x50 m	Nicht Verfügbar
Szenenbreite (Range x Azimut)	80 km x ∞ km	250 km x ∞ km	400 km x ∞ km	20 km x 20 km

Tabelle 5: Azimutauflösung und Szenenbreite der Sentinel 1 Aufnahmemodi (eigene Darstellung nach <https://sentinel.esa.int>)

Ähnlich wie bei TS-X ist die Breite der Szene in Azimutrichtung nur ein Standardwert. Die Angabe „unendlich“ ist so nicht richtig, steht aber als Platzhalter für die Szenenbreite in Azimut. Die tatsächliche Begrenzung erfolgt technisch, durch Überhitzung des Satelliten oder durch den Energieverbrauch.



## 5 Erkennung maritimer Objekte auf SAR- Bildern

Dieses Kapitel dient einer allgemeinen Beschreibung der klassischen, automatisierten Methodik zur Erkennung von maritimen Objekten in Aufnahmen mit SAR. Dazu wird das vom DLR entwickelte Programm SAINT (SAR AIS Integrated Toolbox) genutzt. Entwickelt wurde das Programm um Schiffe automatisch in Radarbildern zu erkennen und zu markieren. Dementsprechend wird in der vorhandenen Literatur kaum auf andere maritime Objekte Bezug genommen. In den Versuchen wurde das SAINT- Programm zur Detektion der Corner Reflektoren angewendet.

### 5.1 Allgemeines

Durch die, im Vergleich mit reflektierenden Objekten, relativ dunkle Wasseroberfläche auf SAR- Bildern, lässt sich ein Unterschied zwischen Hintergrund und Ziel optisch sichtbar machen. Maritime Objekte, wie z.B. Schiffe geben durch ihre Aufbauten eine hohe Signatur wieder, da ein künstlicher CR zwischen Bordwand und Wasseroberfläche entsteht, welcher das Signal zurück zum Satelliten streut.

Die Detektion von Schiffen in Aufnahmen mit SAR erfolgt meist durch die Suche nach ungewöhnlich hellen Pixeln innerhalb der statistischen Verteilung des Sea-Clutter, also der Radarrückstreuung der Wasseroberfläche (VACHON, 2006). Diese Praxis erweist sich jedoch häufig als schwierig, da der Kontrast zwischen Wasseroberfläche und Schiff extrem unterschiedlich sein kann und daher schwer mit einem universellen Algorithmus fehlerfrei erfasst werden kann. PICHEL et al. (2004) unterteilen die Limitationen bei der SAR-Detektion in folgende Kategorien:

- Schiffs-Charakteristika: Ausrichtung zum Sensor, Größe, Material
- Umweltbedingungen: Seegang, Wind, etc.
- Radarcharakteristika: Einfallswinkel, Polarisierung, Auflösung, Sensitivität
- Bildqualität: Speckle, SAR- Prozessierungsfehler
- Bildauflösung: Schwadbreite/ geometrische Auflösung

Die Detektion wird in die Arbeitsschritte Vorprozessierung, Landmaskierung, Vorselektierung, Diskriminierung und Merkmalsextraktion unterteilt, welche unterschiedlichen Algorithmen zugrunde liegen (BRUSCH et al., 2011). Für diese Arbeit sind nur die Arbeitsschritte Vorselektierung und Diskriminierung von Belang.

### 5.2 SAR Parameter

Am Beginn eines jeden Detektions-Szenarios steht die Frage nach den geeigneten Parametern eines SAR-Sensors. Der wohl entscheidendste Kompromiss hierbei ist die Wahl einer ausreichenden Auflösung gegenüber der dabei möglichen Schwadbreite, beziehungsweise die minimal detektierbare Schiffsgröße gegenüber der Größe des zu beobachtenden Gebiets. Während ein SAR eine recht gute geometrische Auflösung, unabhängig von Tageszeit und atmosphärischen Bedingungen liefert, ist die Größe einer Szene meist recht klein. Der Spotlight Modus von TerraSAR-X bietet zwar eine geometrische Auflösung von 1m, eine Szene misst jedoch lediglich 10km x 5km (Range x Azimut). Der verwendete StripMap Modus hingegen bietet Szenen mit 30km x 50km bei einer Auflösung von 3m. Die Szenengröße garantiert eine gewisse Sicherheit den Reflektor abzubilden, bei gleichzeitig guter

Auflösung. Gleichzeitig ist er der Standardmodus für SM- Aufnahmen. Im Modus Spotlight bestünde eine höhere Wahrscheinlichkeit ein Gebiet abzubilden, in dem der Reflektor nicht zu sehen wäre.

Die Aufnahmen mit TS-X wurden zum einen -wie oben erwähnt- im StripMap- Modus gemacht, da es sich dabei um den Standardmodus für Shipdetection handelt, zum anderen da ein Vergleich mit an Land stehenden Reflektoren gezeigt hat, dass in diesem Modus diese auch detektiert werden können.

Für die Aufnahmen mit Sentinel 1 wurden die Modi EW und IW verwendet. Anders als bei TS-X kann keine vorherige Wahl des Aufnahmemodus getroffen werden. Sie werden von der ESA vorgegeben.

Weiterhin entscheidend ist die Wahl der geeigneten Polarisation. HH ist durch eine niedrigere Signatur des Sea-Clutter allgemein besser geeignet als VV. Zwar ist die Intensität am Empfänger bei steilen Einfallswinkeln recht ähnlich, jedoch sinkt die der HH-Polarisation bei größeren Winkeln schneller ab (VACHON et al. 1997:49). YEREMY et al. (2001) empfehlen daher die Kreuzpolarisation HV für Einfallswinkel  $<45^\circ$  und für  $>45^\circ$  HH. Derzeit befinden sich sechs zivil nutzbare SAR-Satelliten mit vier Polarisationen (Quad-Pol) im X- und C- Band im All: Sentinel 1, Alos 2, , RISAT 1, RISAT 2, RadarSat 2 und TerraSAR-X. Für letzteren steht diese Option allerdings nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Insgesamt ist die operationelle Schiffsdetektion oft im Quad- Pol möglich, es gibt aber noch Satelliten mit denen die Schiffsdetektion auf Single-Pol beschränkt ist.

### 5.3 Vorselektierung

In der Literatur ist meist von *prescreening* die Rede, dieser Schritt ist das Herzstück der Detektion. Wie bereits erwähnt suchen traditionelle Detektoren nach ungewöhnlich hellen Pixeln innerhalb einer statistischen Verteilung der Radarrückstrahlung der Wasseroberfläche. Eine Ausweisung dieser Werte direkt aus einem Histogramm erweist sich als fehlerhaft, da hierfür sehr große Proben der Hintergrundstatistik benötigt werden. Kleine Proben sind zu bevorzugen, da so die Homogenität des Sea-Clutters wahrscheinlicher ist und so mögliche Schiffe mit ihrer unmittelbaren Umgebung verglichen werden können. Der Anteil der hellsten Pixel innerhalb einer Verteilung wird als Probability of False Alarm (PFA) bezeichnet und berechnet sich wie folgt:

$$PFA = 1 - \int_{-\infty}^T f(x)dx = \int_T^{\infty} f(x)dx$$

Formel 14: PFA Probability of False Alarm (nach Crisp, 2004)

wobei  $x$  die möglichen Pixelwerte innerhalb einer Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion (auch *Probability Density Function*, PDF)  $f(x)$  beschreibt.  $T$  bezeichnet den unteren Grenzwert der PFA, welcher je nach zugrunde liegender PDF unterschiedlich gewählt werden muss. Daher spricht man auch von einem Algorithmus mit adaptivem Grenzwert bzw. *adaptive threshold algorithm*. Wenn  $T$  so gewählt wird, dass der Anteil der oberhalb liegenden Pixel stets konstant ist, spricht man von einer Constant False Alarm Rate (CFAR), also einer festen Wahrscheinlichkeit an Fehldetektionen für jeden bestimmten Bildausschnitt (CRISP 2004).

Aus Gründen der oft starken Inhomogenität der Radarrückstrahlung, beispielsweise durch Regenzellen und lokale Windvariationen, wird die beschriebene Methodik nie auf das gesamte Bild angewendet, sondern Schrittweise in beweglichen Matrizen für kleine Bildausschnitte berechnet. Der grundlegende Aufbau ist in Abb. 15 zu sehen.

Die Target Box umfasst die Pixel, welche getestet werden und sollte eine ähnliche Größe wie das kleinste zu detektierende Objekt aufweisen. Die Background Area dient der Berechnung der Hintergrundstatistik für den CFAR Detektor und sollte dementsprechend eine ausreichende Größe für eine repräsentative Abschätzung der Seaclutter-Variabilität aufweisen, ohne dabei andere Targets einzuschließen. Die Guard Area dient dem Ausschluss von hellen Pixeln eines Targets (größer der Target Box) und sollte dementsprechend annähernd die Ausmaße des größten zu detektierenden Objektes besitzen. (CRISP 2004). Die Pixelanzahl der einzelnen Boxen ist folglich abhängig von der verwendeten geometrischen Auflösung der Satelliten-Szene und der Zielstellung des Detektionsszenarios. Eine variable Größe des Target-Windows zur Einschließung aller Pixel eines möglichen Targets ist zu empfehlen. Eine Möglichkeit dies zu implementieren, wäre die Nutzung mehrerer Target Windows mit variierender Größe und Form und Auswählen jenes Fensters mit dem größten arithmetischen Mittel (CRISP, 2004).



Abbildung 15: Links: typischer Aufbau einer beweglichen Matrize für einen Algorithmus mit adaptivem Grenzwert; rechts: Target Box mit Target (verändert nach CRISP 2004).

Der SAINT-Detektor des DLR nimmt eine Reduzierung der geometrischen Auflösung in Kauf, um die somit erreichte Gauß'sche Verteilung des Sea-Clutters leichter modellieren zu können. Mit der Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung nimmt der endgültige Detektor folgende Form an:

$$x_t > \mu_b + \sigma_b t \leftrightarrow \text{Target}$$

Formel 15: Target- Ermittlung mittels SAINT (Crisp, 2004)

Wobei  $x_t$  das getestete Pixel,  $\mu_b$  der Mittelwert der Pixel des Hintergrund-Fensters,  $\sigma_b$  die Standardabweichung des Hintergrunds und  $t$  ein PFA-spezifischer Design-Parameter sind. Das Verhältnis von  $t$  zur False Alarm Rate ist sehr komplex und rechenintensiv, weshalb dieser Parameter in der Praxis meist empirisch gesetzt wird (CRISP 2004). Die unveränderliche Größe dieses Design-Parameters über ein gesamtes Bild ist somit, insbesondere bei großer Inhomogenität des Sea-Clutters, fehlerhaft, da hier von einer Verschiebung der statistischen Verteilung ausgegangen werden muss.

## 5.4 Diskriminierung

Die Reduzierung der False Alarm Rate in Szenen mit einer Polarisation beschränkt sich meist auf das Clustern von einzelnen Pixeln innerhalb eines definierten Radius und eine anschließende Messung verschiedener, simpler physikalischer Parameter wie Länge, Breite, gesamter Fläche und Intensität. Das Clustern von einzelnen Pixeln beruht auf der Annahme, dass Schiffe im offenen Meer meist aus Sicherheitsgründen einen Mindestabstand einhalten. SCHWARTZ et al. (2002) nehmen für den SUMO-

Detektor des JRC einen Abstand von 300m an. Detektierte Pixel mit geringerem Abstand werden zu einer Detektion vereint und zu kleine Targets können gegebenenfalls im Anschluss diskriminiert werden.

## **5.5 Wind- und Wellendetektion**

Neben der automatisierten Schiffsdetektion werden auch Programme eingesetzt, um Wind und Wellen in Geschwindigkeit und Richtung zu erfassen. Somit kann eine kombinierte Aussage über Schiffsdetektion und vorherrschende Wetterbedingungen getroffen werden. Das aktuelle Programm um Wind und Windrichtung zu erfassen heißt für Sentinel 1 CMOD 5, das für TS-X XMOD 2. Beide basieren auf dem Weather Research and Forecast (WRF)-Modell. Ein Programm um mit TS-X Wellenhöhe und –richtung zu erfassen heißt XWAVE. Ein Pendant zu Sentinel 1 gibt es noch nicht (XIAO, M.- L., et. al., 2012).

### **CMOD 5**

CMOD5 ist ein vom ECMWF (European Center for Medium Weather Forecast) und KNMI (Royal Netherland Meteorological Institute) entwickeltes nichtlineares Rechenmodell. Es basiert auf der Messung der Bragg- Rückstrahlung (Bragg- Scattering). Aus den erhaltenen Daten kann auf die Wellenbewegung und so indirekt auf die Windgeschwindigkeit und –richtung geschlossen werden. CMOD5 gleicht Datenbanken von tatsächlich gemessene Windgeschwindigkeiten (z.B. FINO 1-3<sup>6</sup>) vor Ort, mit den gemessenen ab und erstellt daraus Modelle über Windrichtung und –geschwindigkeit. Es ist somit ein „lernendes“ Programm, das auf den Vergleich angewiesen ist und immer weiter verfeinert wird (XIAO, M.- L., et. al., 2012).

### **XMOD2**

XMOD2 ist der Nachfolger des Programms XMOD1, welches auf einem nichtlinearen geophysikalischen Rechenmodell basiert. Es nutzt dieselbe Technik wie CMOD5, in dem mit Bragg- Scattering auf die Wellenbewegung und dann indirekt auf Windrichtung und –geschwindigkeit geschlossen werden kann. XMOD2 ist für Windgeschwindigkeiten bis 25 m/s kalibriert worden, wohingegen XMOD1 nur bis 8 m/s kalibriert wurde. Auch XMOD2 ist ähnlich CMOD5 ein „lernendes“ Programm, welches empirisch trainiert wird (XIAO, M.- L., et. al., 2012).

### **XWAVE**

Eine SAR-basierte Seegangshöhenbestimmung ist nur für TerraSAR-X möglich. Dazu wird der sogenannte XWAVE Algorithmus angewendet. Der Algorithmus verwendet eine Fast-Fourier-Transformation (FFT), um aus dem Wellenmuster im SAR-Bild ein SAR-Seegangsspektrum zu berechnen. Dieses SAR-Seegangsspektrum ist nicht identisch zu dem tatsächlichen Seegangsspektrum, kann jedoch dazu verwendet werden, um die Seegangshöhe und andere Seegangparameter wie Wellenrichtung und Wellenlänge indirekt zu bestimmen. Hierzu wurde eine empirische Modellfunktion mit Bojendaten und Parametern aus dem SAR-Seegangsspektrum trainiert. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird in folgender Veröffentlichungen gegeben: (PLESKACHEVSKY, A.L., et. al., 2015).

---

<sup>6</sup> Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee u.a für Wind

## 6 Versuchsaufbau

Die ersten Versuche fanden Anfang März 2016 in den Gebieten der Offshore Windindustrie der Nordsee, im speziellen in den bereits fertig gestellten Windparks BARD Offshore 1 und Global Tech 1 sowie in dem in Bau befindlichen Windpark Veja Mate, statt. Eine Übersicht der bestehenden und entstehenden Windparks ist in Abbildung 17 verzeichnet.

Während des Studiums verdiente ich einen Teil des Unterhalts über das Erfassen von Daten im Zusammenhang mit Vogelzug durch die deutschen Offshore Windparks. Die Firma IBL Oldenburg schickte dazu jeweils vier Ornithologen und eine wissenschaftliche Hilfskraft an Bord diverser Schiffe, um den Vogelzug im Frühjahr und Herbst zu erfassen. Meine Aufgabe war es den Vogelzug mittels eines Vertikalradars nachzuvollziehen und mit Hilfe eines Computerprogramms, empfangene Echos auszuwerten. So bekam ich die Möglichkeit neben der Arbeit meine Versuche durchzuführen.

### 6.1 Vorversuche

Die ersten Versuche, um Erfahrung mit reflektierenden Objekten zu sammeln, fanden mit einer eigens für diesen Zweck konstruierten Version eines Reflektors statt. Dazu wurde eine Leichtbauplatte aus beschichtetem XPS- Schaum mit den Maßen 120 cm x 60 cm x 3 cm als Träger verwendet. Das Material garantierte eine gewisse Schwimmfähigkeit, um die darauf montierten Reflektoren zu tragen. Als Reflektoren wurden vier Grillschalen mit den Maßen 34 cm x 23 cm x 2,5 cm genutzt. Diese wurden mit Kabelbindern auf dem Träger befestigt. Zwei der Grillschalen wurden längs auf der Plattform angebracht und zwei quer (vgl. Abb. 25). Dies sollte gewährleisten, dass einfallende Impulse -unabhängig von der Ausrichtung der Plattform- wieder zurückreflektiert werden sollten. Hinzukam, dass die natürliche Riffelung der Grillschalen positiv auf die RCS wirken sollte.

Als Verbindung zwischen Trägerplatte und Schiff wurde ein Seil der Länge 50 m eingesetzt.

Es zeigte sich schnell, dass überspülende Wellen die Grillschalen deformierten aber nicht abrissen. Auf keinem der SAR- Bilder war ein entsprechendes Objekt zu ermitteln.

### 6.2 Der trihedrale Winkelreflektor

Das zentrale Reflexionsobjekt ist ein trihedraler Winkelreflektor, mit einer Kantenlänge von 23 cm. Gefertigt aus Aluminium beträgt die Materialstärke ca. 1 mm. Der Reflektor ist in einer Steckbauweise zusammengebaut, wobei die Stabilität durch schwarze Endstücke aus Plastik gegeben wird. Damit die Endstücke im Seegang nicht verloren gingen wurden sie mit wasserbeständigem Klebeband am Reflektor befestigt.

Für eine optimale Reflexion der Radarstrahlen musste der Reflektor auf der Spitze stehen. Der mitgelieferte Standfuß war nicht geeignet den CR aufzunehmen, sodass eine Eigenkonstruktion aus Holz, welche mit zwei Schrauben am Reflektor befestigt wurde, eingebaut wurde. Der Standfuß wurde mit zwei Flacheisen am Floß befestigt. Des Weiteren wurde der Reflektor mit drei Tampen zum Floß hin abgespannt, damit dieser stabil auf dem Floß stand (vgl. Abb.26).

Die maximale RCS  $\sigma_{max}$  eines CR kann man mit Hilfe folgender Formel bestimmen. Dafür müssen die Größen  $L$  und  $\lambda$  bekannt sein.  $L$  ist die Kantenlänge des CR in m und  $\lambda$  die Wellenlänge ebenfalls in m.

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi \times L^4}{3\lambda^2}$$

Formel 16: RCS max. Winkelreflektor (Nicolaescu & Oroian, 2001)

$$3,0494m^2 = \frac{4\pi \times 0,23m^4}{3 \times 0,031m^2}$$

Formel 17: RCS max. für den im Versuch genutzten CR

Die Rechnung zeigt, dass der CR eine maximal mögliche RCS von etwas mehr als 3 m<sup>2</sup> aufweist und somit einen genügend großen Radarquerschnitt bildet, um von den Systemen TerraSAR-X und TanDEM-X erkannt zu werden.

Korrosion am CR durch das salzhaltige Seewasser konnte nur in geringen Mengen festgestellt werden. In wieweit dies einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften hat konnte während der Versuche nicht geklärt werden.

### 6.3 Das Floß

Mit drei Holzleisten der Stärke 5 cm wurde das Grundgerüst zu einer Dreieckform verbaut. Jede Leiste wurde mit einer Ausklinkung versehen, sodass das Floß in der Ebene dieselbe Höhe aufwies. Mittig wurde ein Steg angebracht, welcher den Reflektor mitsamt Fuß aufnahm. An den Enden des Floßes wurde jeweils ein fünf Liter Kanister als Schwimmhilfe befestigt (vgl. Abbildung 26).

Mit einem 130 m langen Seil wurde die Gesamtkonstruktion schließlich ausgebracht, sodass es in dieser Entfernung hinter dem Schiff trieb. Während des Ausbringens und der Messungen lagen alle Schiffe vor Anker. So konnte die vorherrschende Strömung das Floß achteraus vertreiben.

Zu Beginn der Messungen wurden verschiedene Daten aufgeschrieben. So zum Beispiel die exakte Position des Schiffes und die vorherrschenden Wetterbedingungen. Das Floß wurde gut 15 Minuten vor dem Überflug des Satelliten ausgebracht, damit noch genügend Zeit zum Vertreiben des Floßes mit der Strömung möglich war. Ca. fünf Minuten nach den Aufnahmen wurde es dann wieder an Bord geholt (Dazu: Beispiel Strömungskarte Abb. 29).

## 6.4 Die Schiffe

Die Versuche wurden von zwei verschiedenen Plattformen aus gestartet. Zum einen war dieses das Schiff „Hydrograf“ (IMO 6724440), zum anderen das Schiff „Reykjanes“ (IMO 7392311). Die Hydrograf ist im Besitz der Firma O.S. Energy, Hamburg. Die Reykjanes ist im Besitz eines Privateigners.

In der folgenden Tabelle sind beide Schiffe und ihre Daten aufgeführt.

	<b>Hydrograf</b>	<b>Reykjanes</b>
IMO Nr	6724440	7392311
MMSI	218298000	219329000
Flagge	Deutschland	Dänemark
Rufzeichen	DFKL	OVS12
Baujahr	1967	1974
Länge x Breite x Tiefgang [ü.a.]	38,79m x 7,83m x 2,9m	41,06m x 8,2m x 4,16m
Bruttotonnage	343	485
Crew	5	4
Geschwindigkeit	12 kn	10 kn

Tabelle 6: Maße und Daten der verwendeten Schiffe (Anfrage an die Schiffseigner)

## 7 Wissenschaftliche Auswertung

### 7.1 Datengrundlage

Bei der Auswahl der Satellitenbilder wurde das Web-Interface Eoweb genutzt. Mit diesem werden die Bestellungen von Satellitenbildern der TS-X und TD-X Missionen bearbeitet. Mit dem Interface ist es möglich das betreffende Gebiet, Datum, Uhrzeit und Aufnahmemodus vorzuselektieren. Sind für die Vorselektierung Überflüge verfügbar, wird die vorberechnete Flugbahn mit den möglichen Abdeckungsstreifen je nach Einfallswinkel dargestellt. Als nächstes werden Aufnahmeparameter wie Einfallswinkelbereich, Polarisation und Streifenlänge ausgewählt (bei SM typischerweise 50 Km), womit die Bestellung in das System geht. Es folgt eine Abfrage der Priorität. Jeder Nutzer, abhängig von seinem Status (z.B. Wissenschaftler, kommerzieller Nutzer, militärische Abfrage) erhält eine bestimmte Priorität, nach der ausgewählt wird, für wen Bilder gemacht werden können. Je höher die Priorität, desto häufiger werden angeforderte Bilder auch geliefert. Das fertige Bild mit allen Rohdaten wird dann auf einen ftp-Server hochgeladen und ein Download-Link in einer E-Mail an den jeweiligen Benutzer ausgeliefert. (<https://centaurus.caf.dlr.de>)

Während der Untersuchungen kam es des Öfteren vor, dass aufgrund der Priorisierung angeforderte Bilder anderweitig vergeben wurden. So wurden von 24 angeforderten Aufnahmen (TS-X), 18 zur Analyse freigegeben. Von den 18 erhaltenen Aufnahmen hingegen waren lediglich acht für die Auswertung geeignet. Die hohe Verlustrate lag vor allem daran, dass Planungsunsicherheiten auf den Schiffen herrschte, sodass zu den Zeitpunkten der Aufnahmen das Schiff seinen Liegeplatz bereits verlassen hatte. Die Aufnahmen von TS-X und Sentinel sind in den Tabellen 7 und 8 zusammengefasst. Eine Übersicht über alle gemachten Aufnahmen sind in Tabelle 9 gelistet.

TSX1_SAR__MGD_SE__SM_S_SRA_20160424T171049_20160424T171053
TSX2_SAR__MGD_SE__SM_S_SRA_20160510T171925_20160510T171933
TSX3_SAR__MGD_SE__SM_S_SRA_20160511T170218_20160511T170226
TSX4_SAR__MGD_SE__SM_S_SRA_20160526T172759_20160526T172807
TSX5_SAR__MGD_SE__SM_S_SRA_20160527T171054_20160527T171102

Tabelle 7: Übersicht der verwendeten TS-X Datensätze (eigene Darstellung)

S1A_EW_GRDM_1SDH_20160511T170858_20160511T171002_011214_010F30_5EE4
S1A_EW_GRDM_1SDH_20160523T170858_20160523T171002_011389_0114EC_0099
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160717T054915_20160717T054940_012184_012E66_430B

Tabelle 8: Übersicht der verwendeten Sentinel 1 Datensätze (eigene Darstellung)



Datum	Uhrzeit UTC	Satellit	Position Schiff $\varphi$	Position Schiff $\lambda$	Incidentangle [°]	Polarisation	Auswertbarkeit
24.04.16	05:49:20	Sentinel 1a/b	54°16,020'N	005°49,481'E	41,7	VH/ VV	Nicht auswertbar
24.04.16	17:10:49	TSX/ TDx	54°16,026'N	005°49,479'E	27	HH	Auswertbar
09.05.16	17:25:11	Sentinel 1a/b	54°30,855'N	006°18,294'E	43,5	VH/ VV	Nicht auswertbar
10.05.16	17:19:25	TSX/ TDx	54°30,857'N	006°18,300'E	41,7	HH	Auswertbar
11.05.16	17:02:18	TSX/ TDx	54°30,860'N	006°18,299'E	16,5	HH	Auswertbar
11.05.16	17:08:58	Sentinel 1a/b	54°30,864'N	006°18,301'E	26,8	HH/ HV	Auswertbar
12.05.16	05:59:44	TSX/ TDx	54°30,856'N	006°18,297'E	30,8	HH	Nicht auswertbar
23.05.16	05:59:42	TSX/ TDx	54°16,080'N	005°49,531'E	35	HH	Nicht auswertbar
23.05.16	05:57:24	Sentinel 1a/b	54°16,080'N	005°49,531'E	33,4	VH/ VV	Auswertbar
24.05.16	05:42:37	TSX/ TDx	54°16,085'N	005°49,533'E	50,3	HH	Nicht auswertbar
26.05.16	17:27:59	TSX/ TDx	54°30,945'N	006°18,323'E	50,5	HH	Auswertbar
27.05.16	17:10:54	TSX/ TDx	54°30,905'N	006°18,268'E	30,4	HH	Auswertbar
28.05.16	17:16:53	Sentinel 1a/b	54°30,899'N	006°18,264'E	35,5	VH/ VV	Nicht auswertbar
28.05.16	17:17:18	Sentinel 1a/b	54°30,899'N	006°18,264'E	35,9	VH/ VV	Nicht auswertbar
17.07.16	05:55:12	TSX/ TDx	54°22,733'N	005°54,402'E	23,6	HH	Nicht auswertbar
17.07.16	05:49:15	Sentinel 1a/b	54°22,733'N	005°54,402'E	35	VH/ VV	Auswertbar
18.07.16	17:12:32	TSX/ TDx	54°22,736'N	005°54,387'E	42,2	HH	Nicht auswertbar
20.07.16	05:50:48	Sentinel 1a/b	54°22,735'N	005°54,389'E	33,7	HH/ HV	Nicht auswertbar

Tabelle 9: Liste der Satellitenüberflüge mit div. Daten (eigene Darstellung)

## 7.2 Darstellung der Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind die verschiedenen Aufnahmen zusammengefasst. In der obersten Zeile ist die Hintergrundverteilung der Intensitätswerte in blau dargestellt. Für eine bessere Darstellung wurde die lineare Skala der kalibrierten Intensitätswerte bei 5 abgeschnitten und auf einen Wertebereich von 0 bis 2000 gestreckt. Formel 18 beschreibt wie aus den Werten auf der X- Achse die ursprünglichen Sigma 0- Werte berechnet werden können.

$$\sigma_0 = \frac{x}{2000} \times 5$$

Formel 18: Umrechnung der kalibrierten Intensitätswerte

Die Linie in rot stellt den Schwellenwert (Threshold) dar, der basierend auf einer Constant False Alarm Rate für die jeweilige Hintergrundverteilung ausgerechnet wurde. Dieser CFAR- Wert wird vom DLR im operationellen Betrieb (SAINT) eingesetzt und wurde empirisch ermittelt. Jeder Bildpunkt der in seiner Intensität den Schwellenwert übersteigt, wird in einer binären Maske als Objektteil markiert. Alle zusammenhängenden markierten Bildpunkte, bilden demnach ein detektiertes, maritimes Objekt.

Die in grün hinterlegte Linie repräsentiert den Wert, den der Reflektor durch seine RCS erreicht. Liegt die grüne Linie auf der x- Achse gesehen rechts von der roten Linie, wurde der Reflektor automatisch detektiert. Liegt er links davon, wurde er nicht detektiert und musste im Zweifel manuell gesucht werden. Hierzu wurden Schiffsposition, Taulänge und Peilung zum Floß verwendet.

In der mittleren Zeile links ist ein Ausschnitt aus dem Satellitenbild zu sehen. Das Schiff wurde dabei mittels eines roten Kreises gekennzeichnet, die Position des Reflektors mit einem grünen Kreis.

Die mittlere Zeile enthält auf der rechten Seite eine Vorort- Fotografie zu dem Zeitpunkt des Überfluges des jeweiligen Satelliten. Es soll veranschaulichen wie die tatsächlichen Bedingungen des Seegangs und Wetters vor Ort waren.

Die untere Zeile rechts enthält geschätzte Werte zu Wind und Seegang. Sie orientieren sich an der Beaufort- Skala (1970) und an dem Seegangsmodell nach Petersen (1939) (vgl. Abb. 16).

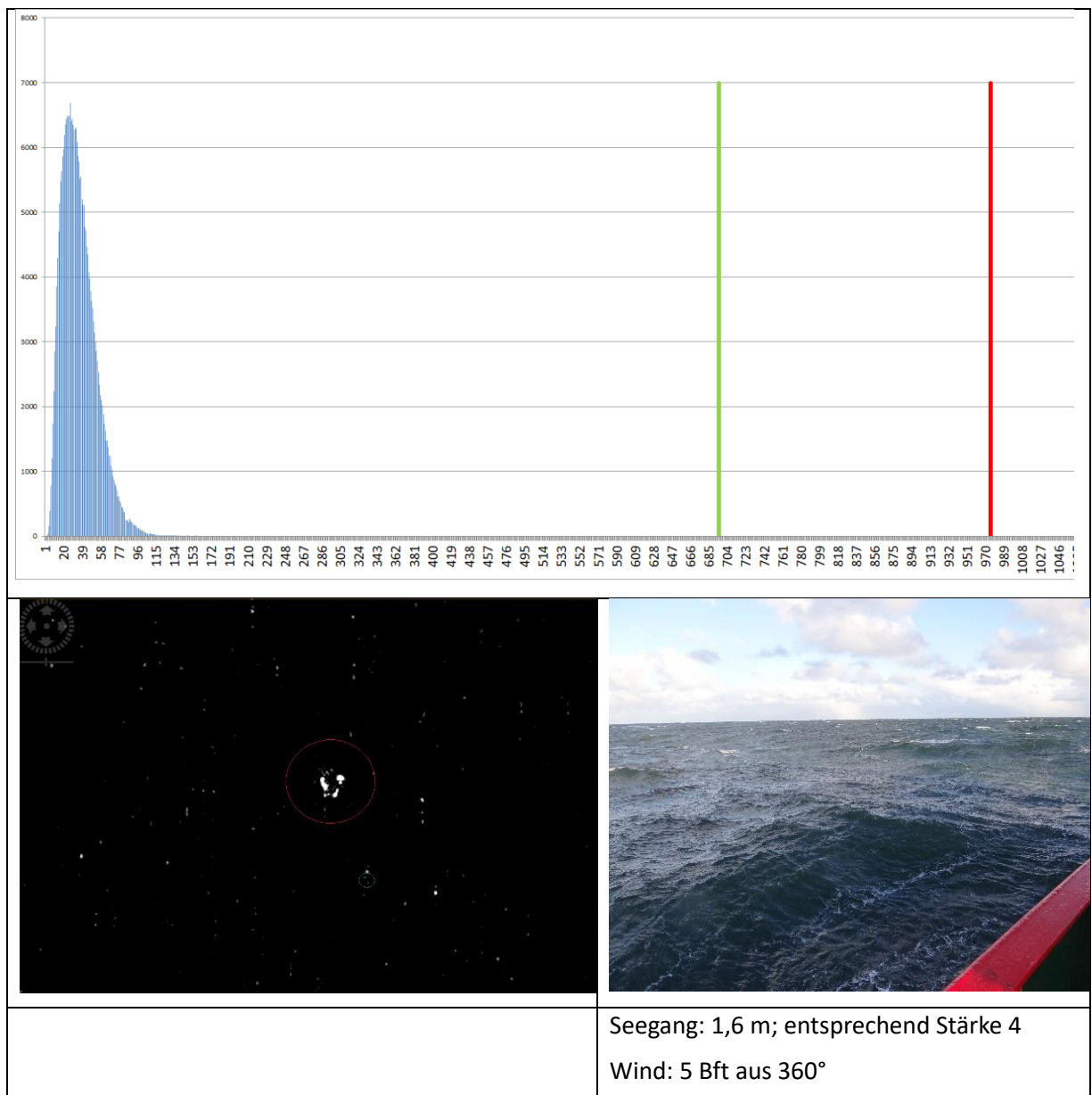


Tabelle 10: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Photographie vom 24.04.16 TerraSAR-X (eigene Darstellung).

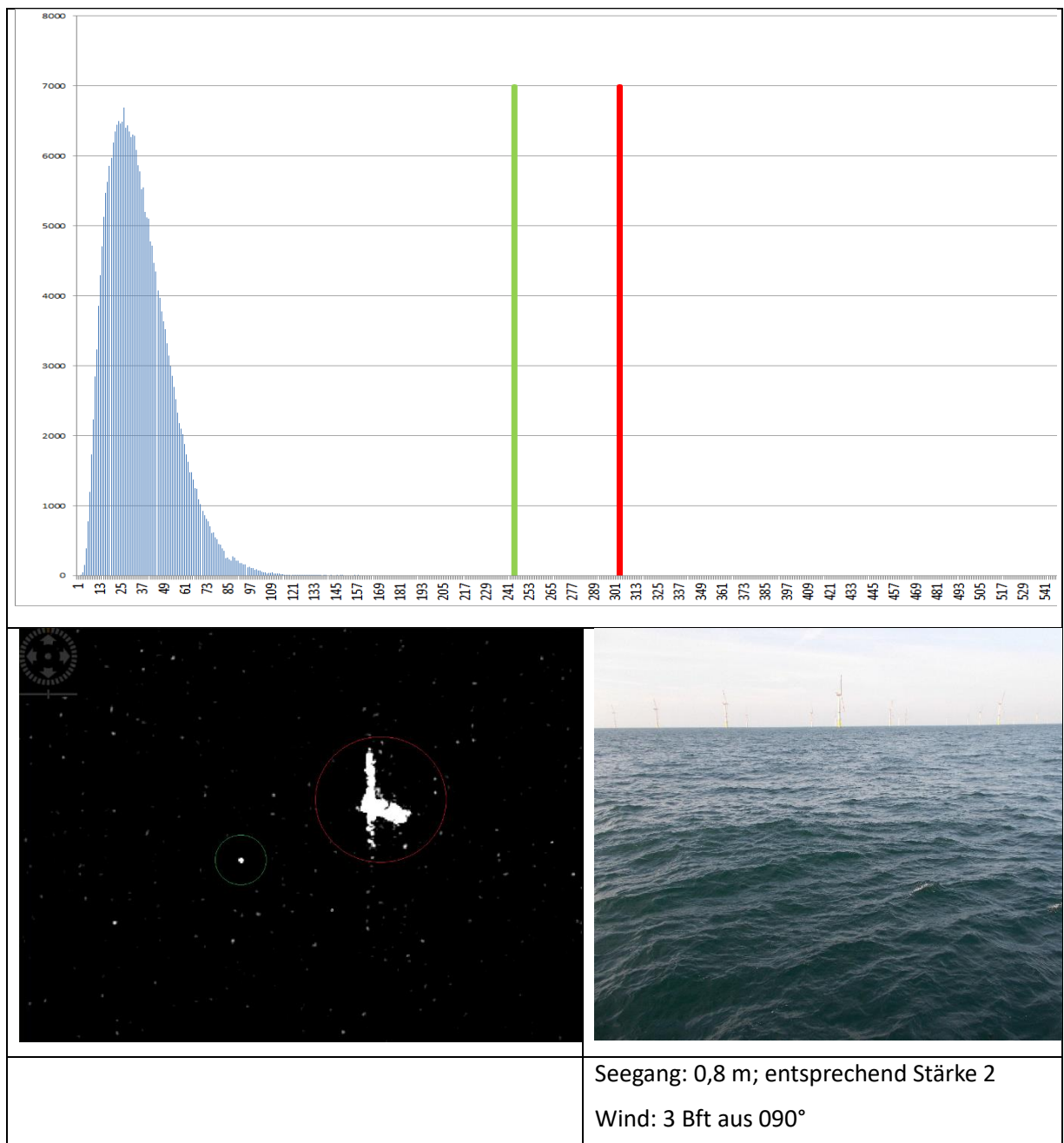


Tabelle 11: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Photographie vom 10.05.16 TerraSAR-X.

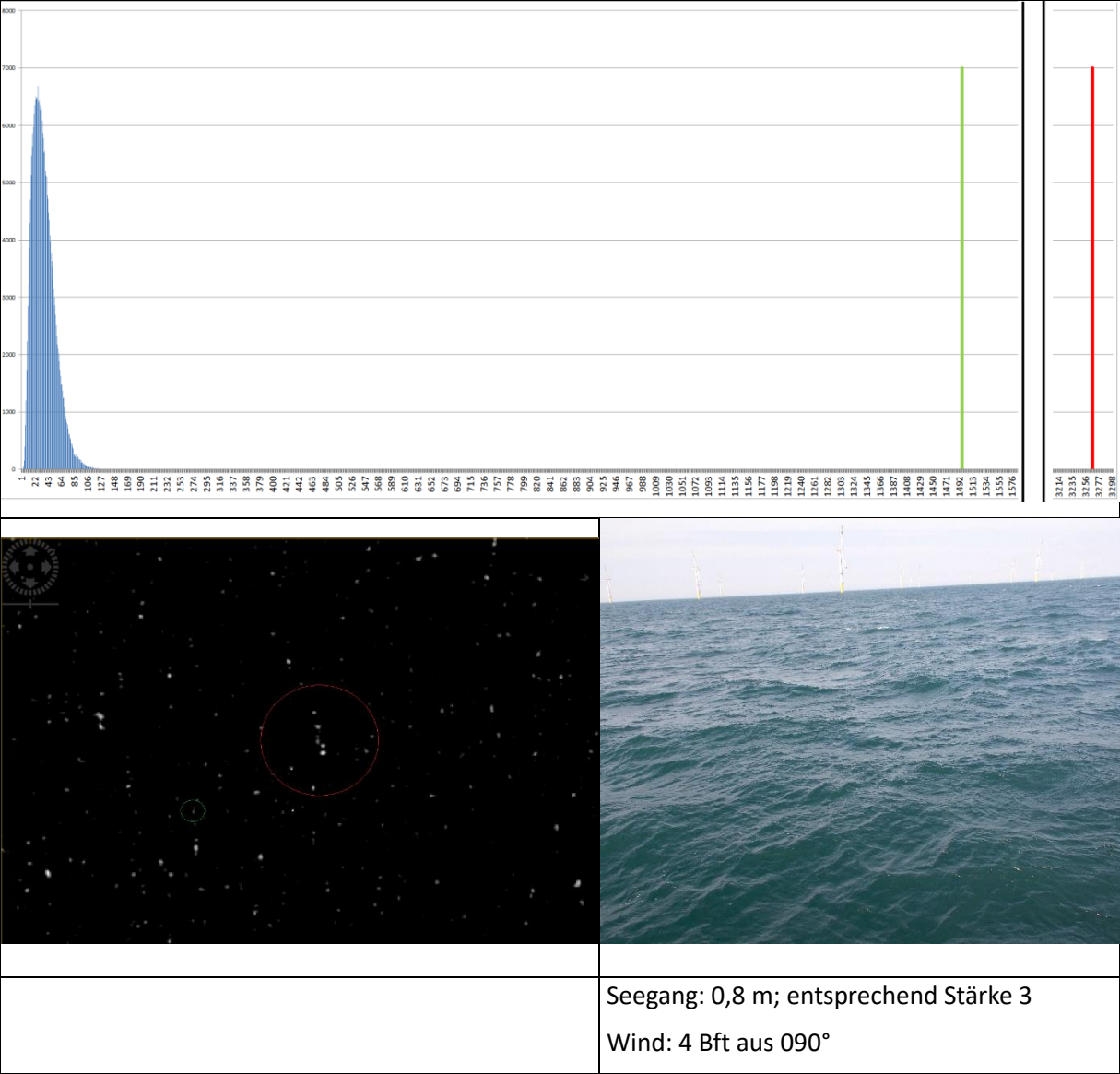


Tabelle 12: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Photographie vom 11.05.16 TerraSAR-X.

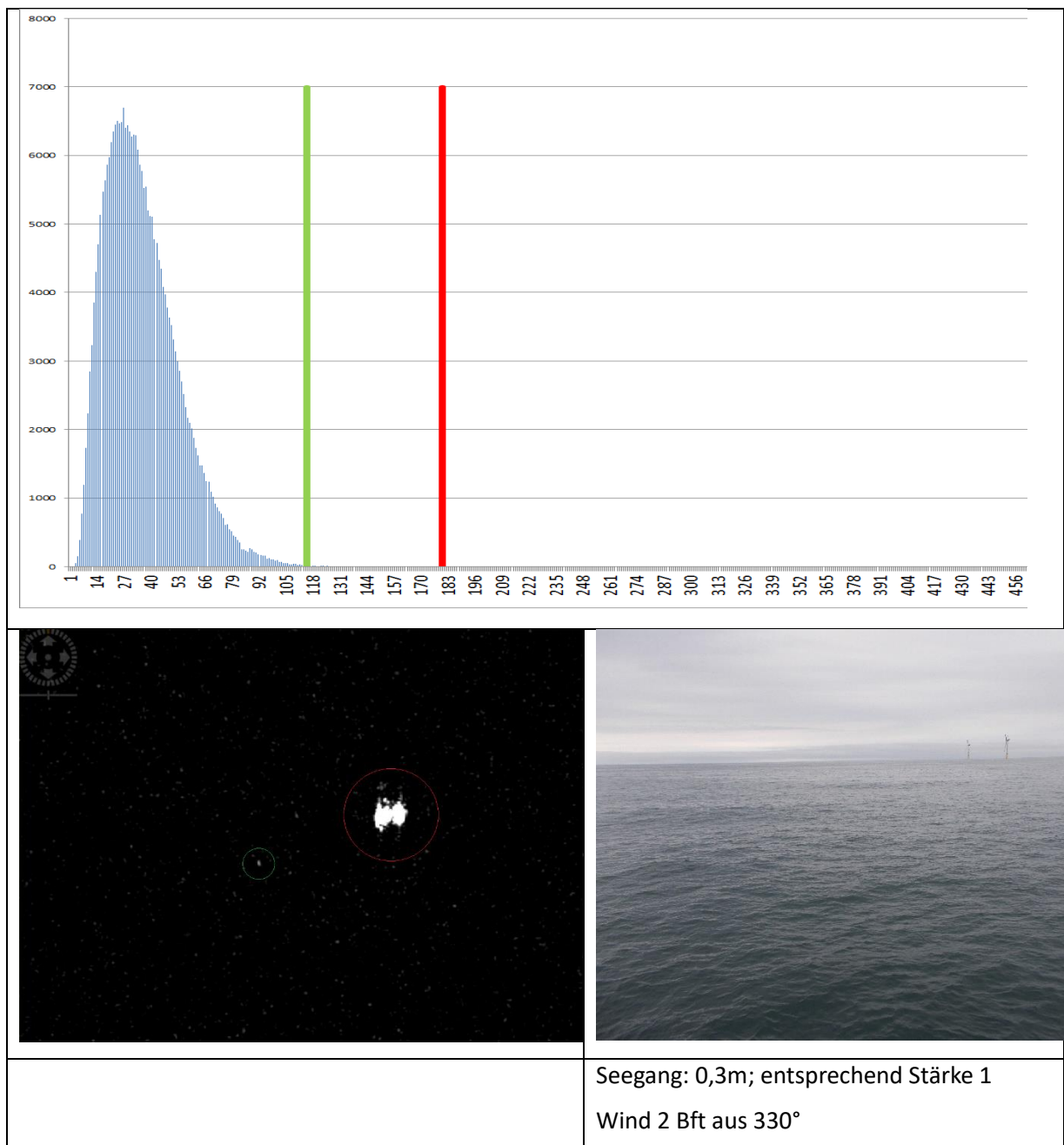


Tabelle 13: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Photographie vom 26.05.16 TerraSAR-X.

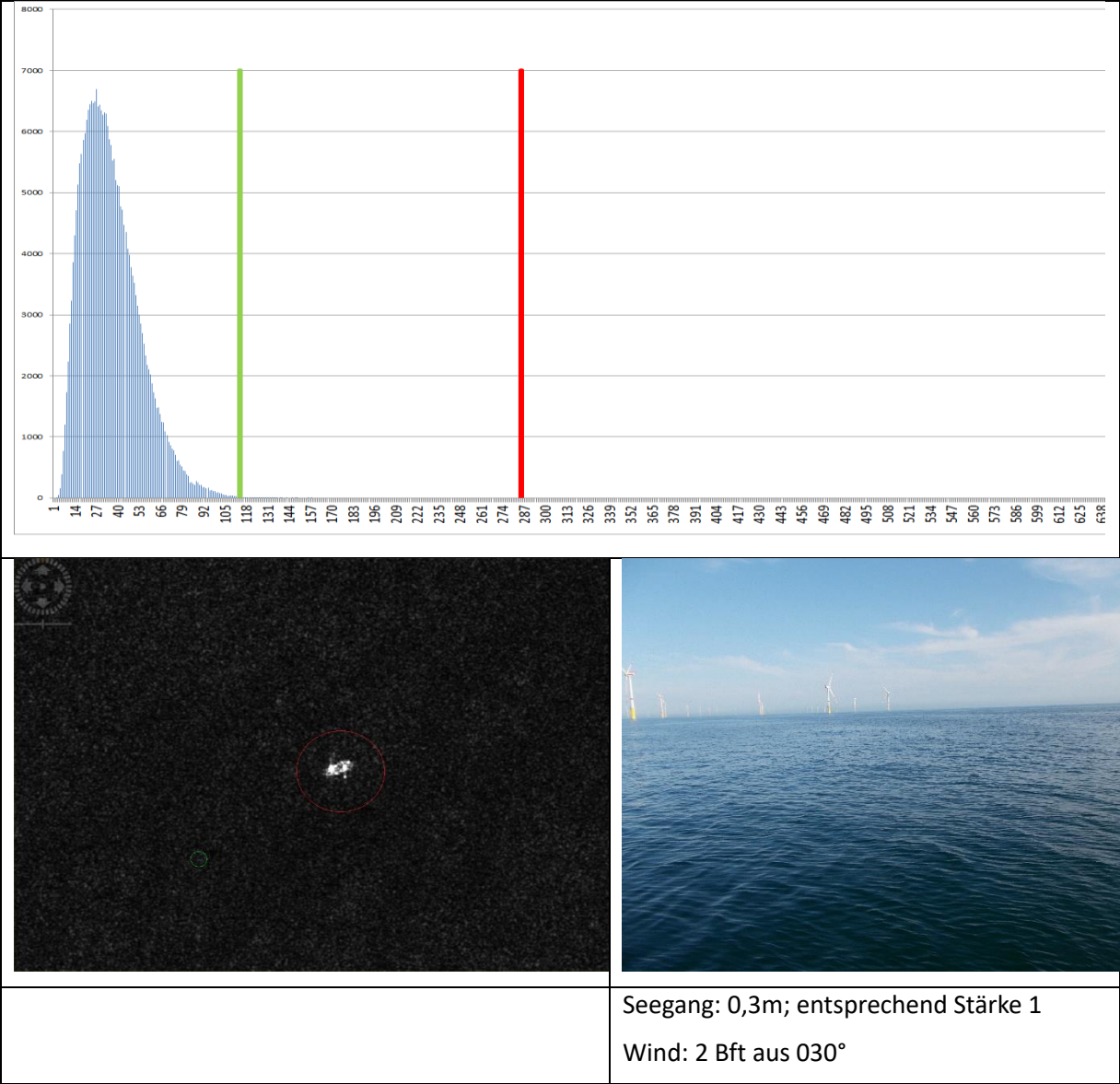


Tabelle 14: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt (HH) und Vorort Fotografie vom 27.05.16 TerraSAR-X.

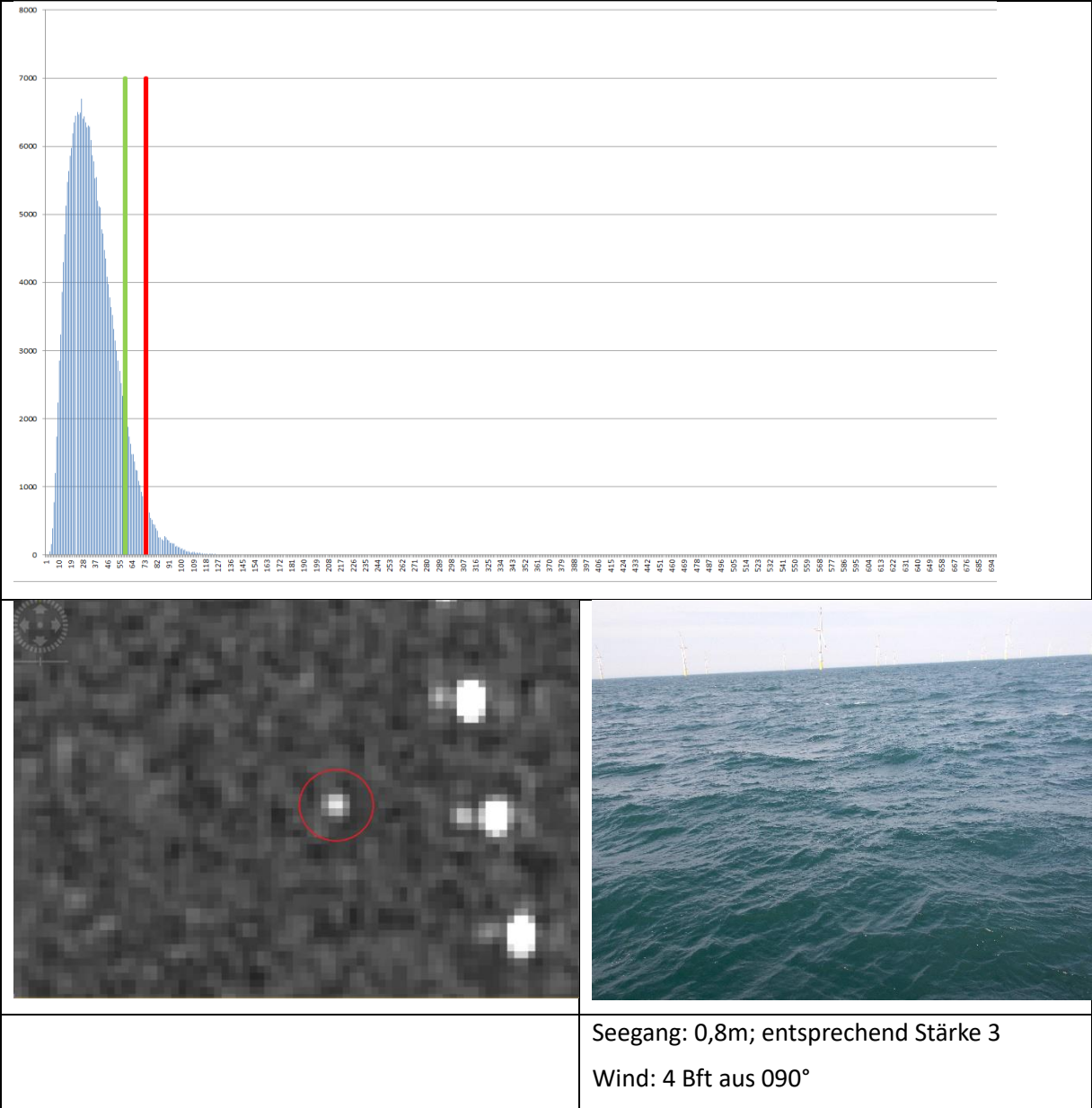


Tabelle 15: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Fotografie vom 11.05.16 Sentinel 1.



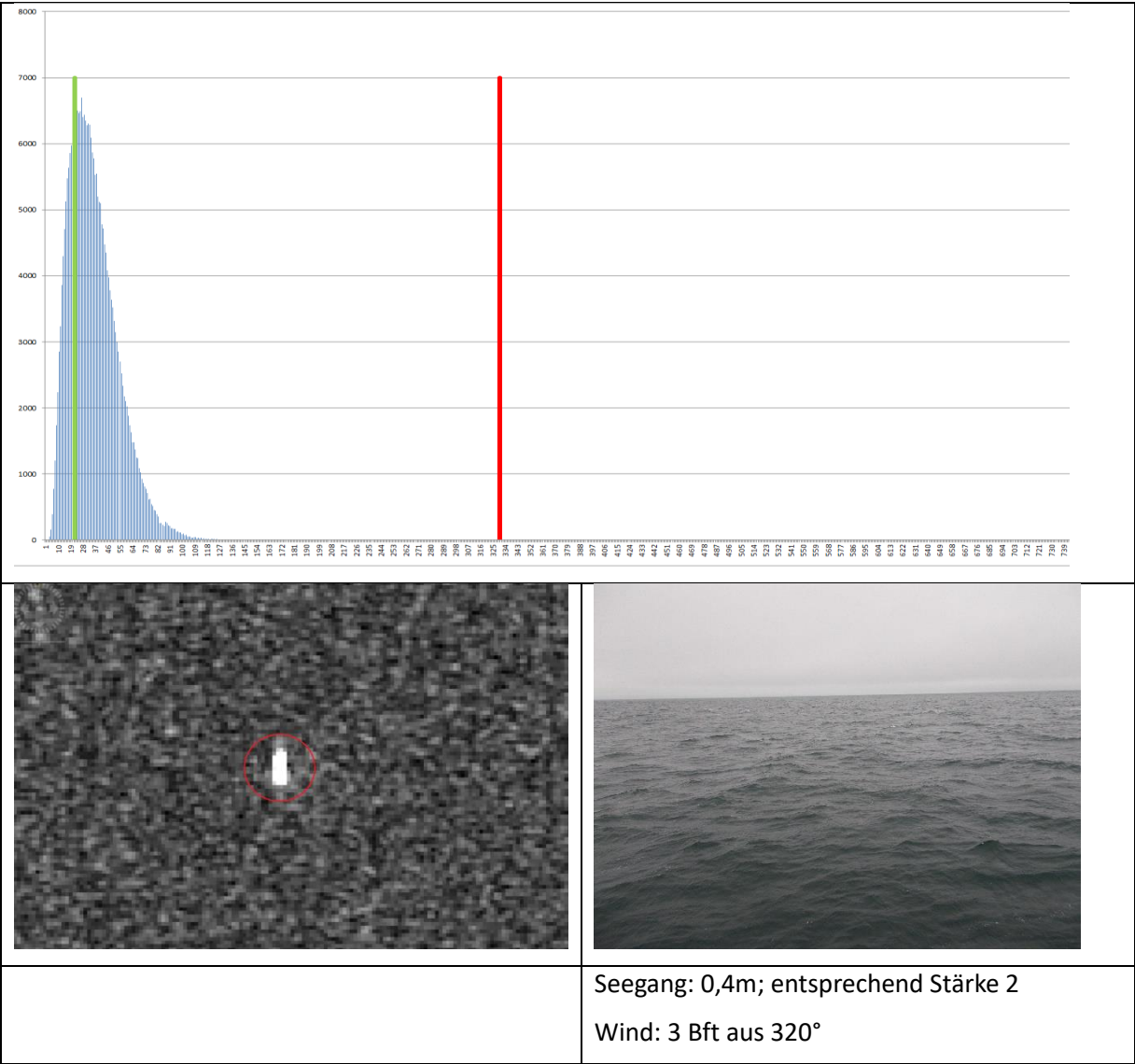


Tabelle 16: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Photographie vom 23.05.16 Sentinel 1.

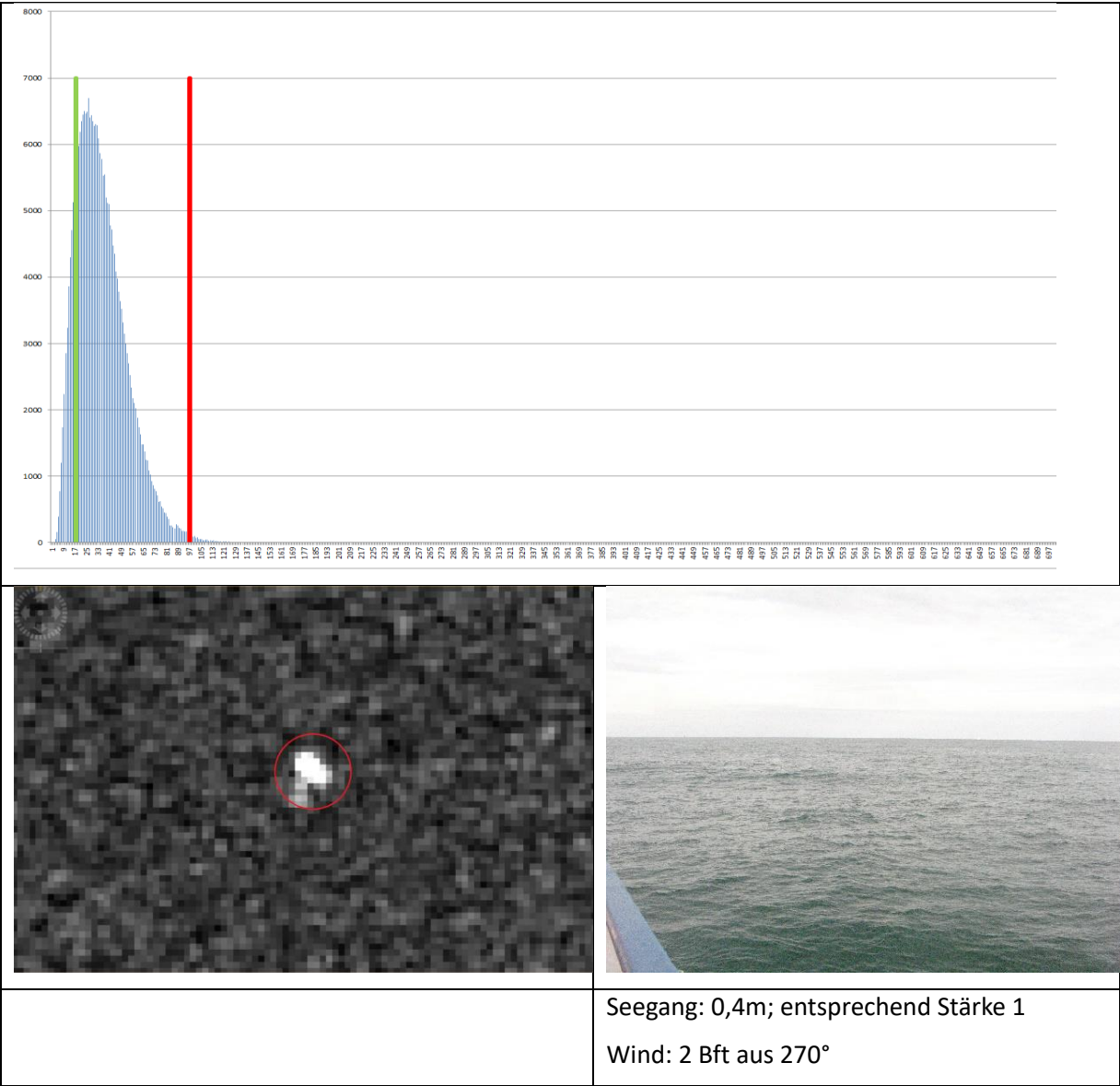


Tabelle 17: Verteilung der Intensitätswerte (RCS) mit entsprechendem SAR-Bildausschnitt und Vorort Fotografie vom 17.07.16 Sentinel 1.

Neben der Anwendung von SAINT für die Informationsgewinnung, wurden die gesammelten Satellitenbilder ebenfalls mit dem Programm SNAP (Sentinel Application Platform) manuell ausgewertet. Es können sowohl Sentinel- 1, als auch TS-X Bilder damit analysiert werden.

In den folgenden Tabellen sind beobachtete Windstärke in Beaufort (Bft) und Richtung, gemessene Windstärke in m/s und Richtung, beobachtete Wellenhöhe in Meter und die gemessene Wellenhöhe (m) zu Vergleichszwecken zusammengefasst.

Die Windrichtung wurde mittels Vorhersage des Weather Research and Forecast (WRF)-Modells ermittelt. Sie dient als Eingabeparameter für einen Algorithmus, welcher indirekt über die Rauigkeit der Wasseroberfläche aus SAR-Bildern die lokale Windgeschwindigkeit ableitet. Für X-Band SAR wurde der XMOD-2 und für C-Band SAR der CMOD-5 Algorithmus verwendet. Beide Algorithmen werden in 5.5 beschrieben.

Eine SAR-basierte Seegangshöhenbestimmung ist nur für TerraSAR-X möglich. Dazu wird der sogenannte XWAVE Algorithmus verwendet, welcher auch in 5.5 erklärt wird.

<b>TerraSAR-X</b>	Beobachtete Windstärke	Gemessene Windstärke XMOD2	Beobachtete Wellenhöhe	Gemessene Wellenhöhe XWAVE
24.04.16	5 Bft aus 360°	9,5 m/s aus 355°	1,6 m	1,2 m
10.05.16	3 Bft aus 090°	8,2 m/s aus 075°	0,8 m	Fehlwert
11.05.16	4 Bft aus 090°	9,1 m/s aus 078°	0,8 m	2,2 m
26.05.16	2 Bft aus 330°	3,1 m/s aus 324°	0,3 m	0,31 m
27.05.16	2 Bft aus 030°	5,4 m/s aus 059°	0,3 m	Fehlwert

Tabelle 18: Windstärken und Wellenhöhen TS-X zusammengefasst (eigene Darstellung)

<b>Sentinel 1</b>	Beobachtete Windstärke	Gemessene Windstärke CMOD5	Beobachtete Wellenhöhe	Gemessene Wellenhöhe
11.05.16	4 Bft aus 090°	5,2 m/s aus 078°	0,8 m	Nicht messbar
23.05.16	3 Bft aus 320°	3,1 m/s aus 345°	0,4 m	Nicht messbar
17.07.16	2 Bft aus 270°	2,0 m/s aus 292°	0,4 m	Nicht messbar

Tabelle 19: Windstärken und Wellenhöhen Sentinel 1 (eigene Darstellung)

## 8 Diskussion

Beim Auswerten der Bilder mit der SAINT- Software fiel schnell auf, dass der Reflektor nie und das Schiff selten automatisch detektiert worden sind, wohingegen der in der Nähe befindliche Windpark oder auch größere Schiffe stets detektiert wurden. Im Vergleich hatten die einzelnen Windräder und Schiffe eine höhere RCS aufzuweisen, sodass der Grenzwert überschritten wurde und sie dadurch von der Software erkannt werden konnten. Das manuelle Detektieren mittels SNAP, erwies sich dahingehend als zuverlässiger. Durch die vorher bestimmte Position des Reflektors mit Hilfe von Peilung und bekannter Seillänge, wurden helle Bildregionen an den jeweiligen Positionen der Radarreflektoren erkannt und man konnte so logisch auf den richtigen Pixel schließen. Dieses Vorgehen wäre jedoch ohne die vorherige, genaue Kenntnis der Reflektorposition nicht möglich (vgl. SAR- Bild Tabelle 11).

Mit dem Programm SAINT ist es möglich, Ziele mit einer Mindest- RCS automatisiert zu erkennen. Dafür ist es notwendig, dass das Target sich vom Hintergrundrauschen absetzt und damit die PFA möglichst gering gehalten wird. Man kann die detektierten Targets mit den Programmen XMOD-2, CMOD- 5 und XWAVE (vgl. 5.5) weiter differenziert analysieren. Interessant wäre z.B. die Fragestellung wie groß ein Reflektor sein muss, welche Geometrie er aufweisen muss und unter welchen Einfallswinkeln er zuverlässig zu detektieren ist. Für eine derartige Studie werden aber wesentlich mehr Daten benötigt, welche unterschiedliche Bedingungen abdecken (Aufnahmen von unterschiedlichen Reflektoren, ausgesetzt unter variierenden Umweltbedingungen und Aufnahmeeinstellungen).

Schaut man sich die Auswertungen der Winddaten an, ist dort eine recht große Diskrepanz zwischen den einzelnen Werten ersichtlich. Fehlerbehaftet sind sowohl die beobachteten Werte, da subjektiv ermittelt, als auch die gemessenen Werte, welche im Vergleich stark variieren. Dazu ist auch zu sagen, dass die Programme der Windbestimmung noch keine zuverlässigen Aussagen treffen. Sie müssen weiterhin „angelernt“ werden, was Fehler in der Aussage zur Folge hat. Lediglich in der Richtung sind die Werte im Großen und Ganzen stimmig. Die ausgegebenen Daten von XWAVE sind noch etwas schlechter in ihrem Aussagecharakter. Zwei von fünf Werten konnten gar nicht bestimmt werden und einer liegt weit über der beobachteten Wellenhöhe (vgl. Fotos Tab. 10- 17). In wieweit das Wettergeschehen Einfluss auf die Detektierbarkeit hat, konnte letztendlich nicht genau geklärt werden. Dazu sind umfangreichere Untersuchungen mit wechselnden Umweltbedingungen nötig. Doch ist davon auszugehen, dass die bewegte Wasseroberfläche Einfluss auf die Detektion hat. Denn vergleicht man die Aufnahmen im maritimen Umfeld mit denen an Land (Paper von Martin Willberg, „SAR-Messungen kostengünstiger Radarziele in Wettzell“, 2015) sind die Cornerreflektoren der gleichen Größe immer deutlich zu sehen. Diese Beobachtung kann unterschiedlicher Natur sein. Anzunehmen wäre, dass der feste Stand an Land, die Ausrichtung des Reflektors weniger beeinflusst, als die sich stets bewegende Oberfläche des Meeres. Dieses führt zu veränderten Ausrichtungen des Reflektors in Richtung der eintreffenden elektromagnetischen Wellen. Neben dem Kippen des CR während der Aufnahme, ist auch das Rotieren des CR zu nennen. Beim Kippen würde der Effekt der Doppler-Verlagerung greifen, was eine Verschmierung der Reflektorabbildung zur Folge haben kann. Dadurch wird die vorhandene RCS auf mehrere Bildpunkte verteilt und die Reflektorsignatur hebt sich dadurch insgesamt schlechter vom Hintergrund ab. Bei hohen Schiffen kann dieser Effekt deutlich beobachtet werden, weil sich größere Entfernungsvariationen zwischen Satellit und Target ergeben. Während der Reflektor an Land perfekt in die Richtung des Satelliten ausgerichtet werden konnte, sorgt auf der

Wasserobfläche die Rotation dafür, dass die elektromagnetischen Wellen nicht kontinuierlich optimal eintreffen. Dies hat eine reduzierte RCS zu Folge.

Eine weitere Frage, die sich mit der Zeit aufdrängte war, wie groß der Guard Ring bei der automatisierten Erkennung mittels SAINT wirklich war, und ob das nicht auch ein Grund sein könnte, dass der CR nicht erkannt wurde. Diese Problematik wird jedoch durch eine zweite Iteration im Programm gelöst, in welcher die Hintergrundverteilung nach vorheriger Filterung der bereits erkannten Ziele neu berechnet wird.

Nach dem Auswerten der Bilder wurde klar, dass nur TS-X mit seiner hohen Auflösung in der Lage war den CR sichtbar zu machen, auch wenn die automatische Detektion nicht funktioniert hat. Die Recherchen zeigten, dass für Sentinel 1 der CR zu klein dimensioniert war. Denn um das Target mit Sentinel 1 erkennbar zu machen, muss man den CR vergrößern. In der umgestellten Formel 19 lässt sich die minimale Kantenlänge des CR errechnen, wenn man für  $\sigma_{max}$  die höchste mögliche Auflösung einsetzt und für  $\lambda$  die Wellenlänge von 0,054 m (vgl. Formel 7).

$$L = \sqrt[4]{\frac{\sigma_{max} \times 3 \times \lambda^2}{4\pi}}$$

Formel 19: Berechnung Kantenlänge CR für Sentinel 1 (umgestellt vgl. Formel 7)

$$0,35 \text{ m} = \sqrt[4]{\frac{21 \times 3 \times 0,054^2}{4\pi}}$$

Formel 20: Berechnung Kantenlänge CR für Sentinel 1

Daraus ergibt sich, dass die Kantenlänge eines ausreichend großen CR mindestens 0,35 m betragen muss. Zumindest wenn man die geometrische Form beibehält. Targets im X- Band wären folglich aufgrund der Größe wesentlich besser zu erkennen. Somit ist die Wahl des Frequenzbandes sowie die dazugehörige Größe des CR bei Folgeexperimenten abzuwägen. Es gilt auch zu berücksichtigen, dass bei Sentinel 1 weitaus größere Gebiete abgedeckt werden können und TS-X durch den baulich kleiner dimensionierten Energievorrat nicht ständig senden/ empfangen kann.

Für die weitere Forschungen könnte man herausfinden, ab welcher Größe ein CR mit dem jeweiligen System stets oder zumindest oft automatisch zu detektieren ist oder ob die Höhe des CR über der Wasseroberfläche eine entscheidene Rolle spielt sowie welche weiteren Arten von Reflektoren eingesetzt werden können.

## **9 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde untersucht, wie sich ein trihedraler Cornerreflektor (CR) mit der Kantenlänge  $L = 0,23$  m im maritimen Umfeld, mittels SAR- Technik detektieren lässt. Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Dazu wurde im Zeitraum April 2016 bis Juli 2016, bei unterschiedlichen Wetterbedingungen, ein Radarreflektor in der Nordsee ausgebracht. Die Radarsatelliten TerraSAR-X und Sentinel 1 überflogen das Gebiet in dem der CR ausgebracht wurde und machten Aufnahmen mit unterschiedlicher Auflösung. Die erhaltenen Daten wurden mit zwei Methoden untersucht. Manuell mit dem Programm SNAP und automatisch mit dem vom DLR entwickelten Programm SAINT.

Bei der Analyse der entstandenen Bilder wurde untersucht, wie gut der Reflektor im Vergleich zum Hintergrund und anderen Objekten zu detektieren war, bzw. ob er überhaupt zu detektieren war. Dazu wurde der Radarquerschnitt (RCS) ermittelt, der ein Maß für die Intensität ist, mit der Radarstrahlung zurück zur sendenden Plattform reflektiert wird. Vereinfacht kann man sagen: Je größer der Unterschied zwischen dem fokussierten Objekt und der allgemeinen Hintergrundhelligkeit ist, desto heller erscheint das Objekt auf dem Bild und lässt sich somit besser erkennen. Das Programm SAINT wurde auf Basis der Gauß'schen Normalverteilung mit adaptivem Grenzwert entwickelt, sodass die Helligkeit des gewünschten Objektes über dem Grenzwert liegen muss, um von dem Programm erkannt werden zu können.

Es konnte herausgefunden werden, dass der CR für automatisierte Erkennung mittels SAINT insgesamt zu klein dimensioniert war. Bei der manuellen Detektion mittels SNAP konnte der CR auf Bildern von TerraSAR-X in zwei Fällen sicher, und in weiteren drei Fällen nur durch Peilung und Abstandsmessung erkannt werden, da er im Rauschen des Hintergrundes nicht klar zu bestimmen war. Alle drei Bilder von Sentinel 1 konnten weder mit SAINT noch mit SNAP erfolgreich ausgewertet werden. Dieses war auf die zu klein gewählte Größe des Reflektors zurückzuführen (vgl. Formel 20).

Diese Grundlagenforschung bietet sich an, um weitere Versuche mit variablen Reflektorgößen oder anderen Arten von Reflektoren zu machen. Für den maritimen Bereich wäre dort vor allem die Lüneburg- Linse als Retroreflektor zu nennen (Abb. 29). Sie ist eine kugelförmige Gradientenindexlinse mit verspiegelter Rückseite. Der Vorteil liegt darin, dass einfallende Wellen wie bei einer Sammellinse im Zentrum der Rückseite fokussiert werden und in die Richtung der Quelle zurückgestreut werden. Somit würden Bewegungen rotatorischer und translatorischer Art sowie die Abhängigkeit des Einfallswinkel, vermutlich nicht mehr von Belang sein. Steve LUKE berichtet in seiner Untersuchung über Marine Radar Reflektoren über eine gute RCS, jedoch sei die Lüneburg- Linse POLARef relativ schwer und der Stückpreis von 2000 £ sehr hoch (vgl. LUKE, 2007). Dazwischen sind jedoch auch andere Modelle mit ihren Vor- und Nachteilen angesiedelt. Für einen flächendeckenden Einsatz wäre der in der Arbeit verwendete CR von Vorteil, da er zu den preisgünstigen zählt. Da gilt es Kosten und Nutzen in Einklang zu bringen.

Anwendungsgebiete für die spätere Forschung mit Reflektoren im maritimen Umfeld wären z.B. das automatisierte Erkennen von Bojendrift, Untersuchungen von Meeresströmungen oder die Erfassung der Eisschollendrift.

## 10 Anhang

### 10.1 Literaturquellen

- ALBERTZ, J.: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 4. Edition. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2009
- BRUSCH, S., LEHNER, S., FRITZ, T., SOCCORSI, M., SOLOVIEV, A., VANSCHIE, B.: Ship Surveillance with TerraSAR-X. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49, 3, 2011
- DETLEFSEN, J.: Radartechnik: Grundlagen, Bauelemente, Verfahren, Anwendung. Berlin: Springer-Verlag, 1989
- GÖBEL, J.: Radartechnik: Grundlagen und Anwendungen, 2. Edition. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2011
- KAISERLICHES PATENTAMT: Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden. Patentschrift Nr. 165546. Patenteigner: Christian Hülsmeier. Berlin: Bundesdruckerei, 1905
- KLAUSING, H. und HOLPP, W.: Radar mit realer und synthetischer Apertur. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2000
- KRAUS, K. und SCHNEIDER, W.: Fernerkundung Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Bonn: F. Dümmeler Verlag, 1988
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W.: Remote Sensing and Image Interpretation, 7. Edition. Hoboken, NY: Wiley, 2015
- NICOLAESCU, L., OROIAN, T.: Radar Cross Section: International Conference on Telecommunication in modern Satellite cable and broad casting services, 5<sup>th</sup> Conference. IEEE, 2001
- PICHEL, W.G., CLEMENTE-COLON, P., FRIEDMAN, K., WACKERMAN, C.: Ship and Wake Detection. In: JACKSON, C.R. & J.R. APEL (Hrsg): Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual. Washington D.C.: Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2004
- RICHARDS, J.A.: Remote Sensing with Imaging Radar. Heidelberg: Springer, 2009
- SCHWARTZ, G. et al.: Elimination of false Positives in Vessels Detection and Identification by Remote Sensing. IGARSS, 2002
- SKOLNIK, Merrill I.: Radar Handbook, 3. Edition. New York: The Mc Graw- Hill Companies, 2008
- VACHON, P.W.: Ship Detection in Synthetic Aperture Radar Imagery. Proceedings OceanSAR 2006; Third Workshop on Coastal and Marine Applications of SAR. St. John's, 2006
- VOGES, E.: Hochfrequenztechnik: Bauelemente, Schaltungen, Anwendungen, 3. Edition. Heidelberg: Hüthig- Verlag, 1987
- WOODHOUSE, Iain H.: Introduction to Microwave Remote Sensing. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006

**Paper:**

LUKE, Steve: Performance investigation of marine radar reflectors on the market. QinetiQ Ltd. Hampshire, 2007

MOREIRA, A.: Radar mit synthetischer Apertur: Grundlagen und Signalverarbeitung, Forschungsbericht, Oberpfaffenhofen: DLR, 2001

PLESKACHEVSKY, A.L., et. al.: Meteo-marine parameters for highly variable environment in coastal regions from satellite radar images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015

STASTNY, J. et al.: Application of RADAR Corner Reflectors for the Detection of Small Vessels in Synthetic Aperture Radar. IEEE Journal of selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing, VOL. 8, NO. 3, MARCH 2015

WILLBERG, M.: SAR- Messungen kostengünstiger Radarziele in Wettzell, DLR, 11/2015

XIAO, M.- L., LEHNER, S: Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and TanDEM-X data. IEEE TGRS-2012-00997, 2012

**10.2 Internetquellen:**

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/bragg.html>

<http://tech.snmjournals.org/content/32/3/139/F1.expansion.html>

<http://www.bsh.de/aktdat/modell/stroemungen/archiv/DB20160510.jpeg>

[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10212/332\\_read-9925/#/gallery/14256](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10212/332_read-9925/#/gallery/14256)

[http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/TSX\\_brosch.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/TSX_brosch.pdf)

[http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459\\_9\\_201408\\_tsxx-itd-ma-0009\\_tsx-productguide\\_i2.00.pdf](http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_201408_tsxx-itd-ma-0009_tsx-productguide_i2.00.pdf)

<http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa13.de.html>

<https://centaurus.caf.dlr.de:8443/eoweb-ng/tutorial/index.html>

<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-2-algorithms/formatting>

[https://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/fp7/fp7-space-2012-1/31656-s1-rs-mda-52-7440product\\_definition\\_2\\_3\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/fp7/fp7-space-2012-1/31656-s1-rs-mda-52-7440product_definition_2_3_en.pdf)

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-064A-02>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/resolutions/level-1-ground-range-detected>

<https://www.yumpu.com/de/document/view/22717651/seegangsskala-und-wind-chill-faktor>



## 10.3 Bilder

bft	kn	m/s	km/h	Bezeichnung	Beschreibung	See	Bezeichnung	Beschreibung
0	0 - 1	0 - 0,2	0 - 1	Windstille	keine Luftbewegung	0	glatte See	Spiegelglatte See
1	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	Leiser Zug	Windrichtung nur am zeihenden Rauch erkennbar	1	sehr ruhige See	Kleine schuppenförmige Kräuselwellen ohne Schaumkämme
2	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	Leichte Brise	Wind im Gesicht fühlbar	2	ruhige See	Kleine kurze wellen, Kämme glasig, brechen aber nicht
3	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	Schwache Brise	Blätter werden bewegt, leichte Wimpel gestreckt	2		Die Kämme beginnen zu brechen, Schaum glasig, vereinzelt Schaumköpfe
4	11 - 15	5,5 - 7,9	20 - 28	Mäßige Brise	Zweige werden bewegt, schwere Wimpel gestreckt	3	leicht bewegte See	Wellen noch klein, werden aber länger, verbreitet weiße Schaumköpfe
5	16 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	Frische Brise	Größere Zweige werden bewegt, Wind im Gesicht schon unangenehm	4	mäßig bewegte See	Mäßige, ausgeprägte Wellen, überall weiße Schaumkronen, vereinzelt Gischt
6	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	Starker Wind	Größe Zweige werden bewegt, Wind singt in der Takelage	5	ziemlich grosse See	Bildung grosser Wellen beginnt, Kämme brechen, größere weisse Schaumflecken, etwas Gischt
7	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	Steifer Wind	Schwächere Bäume werden bewegt, fühlbare Hemmungen beim Gehen gegen den Wind	6	grobe See	See türmt sich, weißer Schaum beginnt sich in Windrichtung zu legen
8	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	Stürmischer Wind	Große Bäume werden bewegt, Zweige abgebrochen, beim Gehen erhebliche Behinderung	7	hohe See	Mäßig hohe Wellenberge mit Kämmen von beträchtlicher Länge, Gischt weht ab, ausgeprägte Schaumstreifen in Windrichtung
9	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	Sturm	Leichtere Gegenstände werden aus ihrer Lage gebracht, Schäden an Dächern			See türmt sich, weißer Schaum beginnt sich in Windrichtung zu legen
10	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	Schwerer Sturm	Bäume werden entwurzelt, Häuser beschädigt	8	sehr hohe See	Sehr hohe Wellenberge mit langen, überbrechenden Kämmen, See weiß durch Schaum, schweres stossartiges Rollen der See, Sicht durch Gischt beeinträchtigt

Abbildung 16: Beaufortskala links und Seegangsskala rechts, nach Petersen (<https://www.yumpu.com/de>)

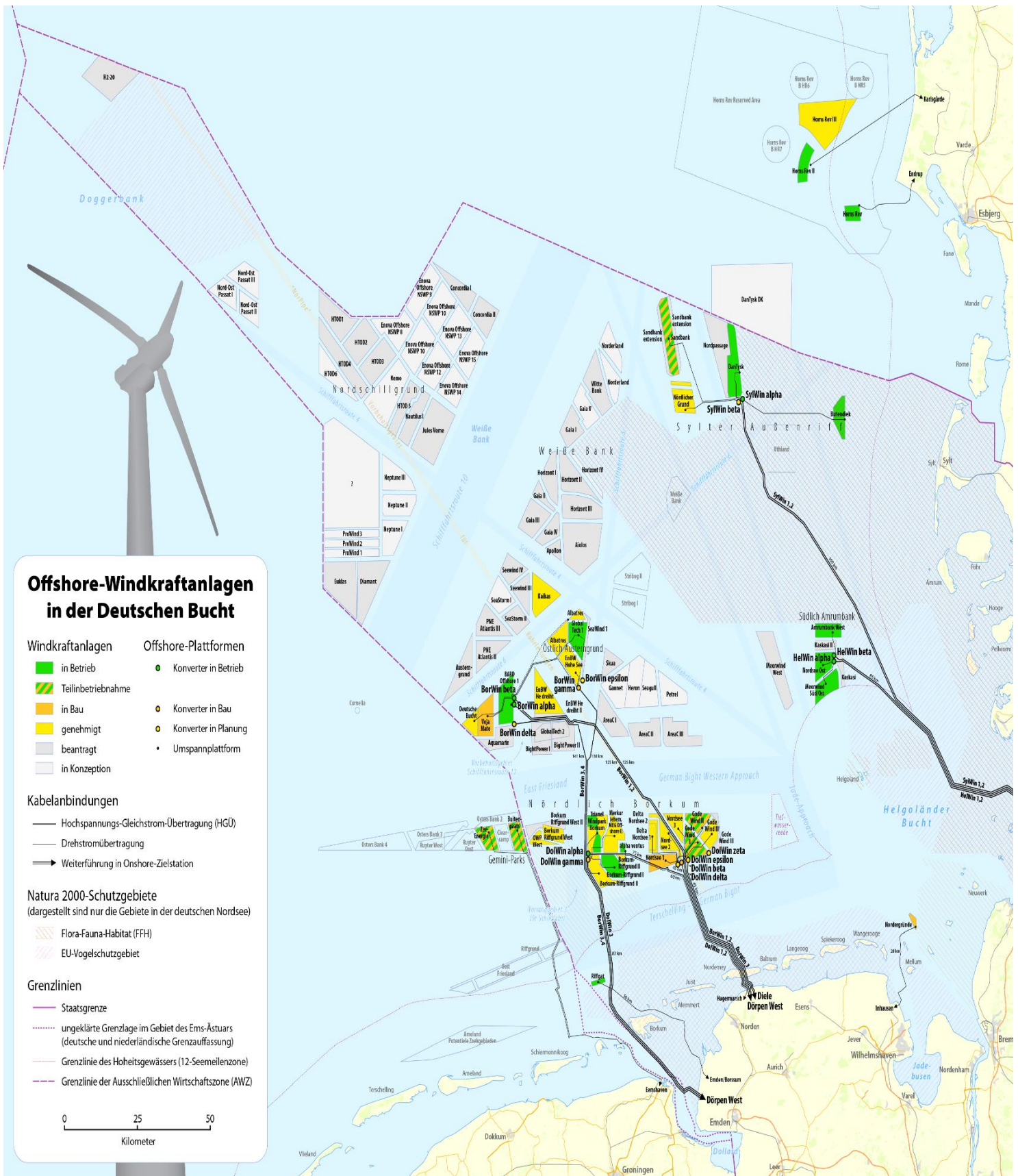


Abbildung 17: Offshore Windanlagen in der Deutschen Bucht

([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karte\\_Offshore-Windkraftanlagen\\_in\\_der\\_Deutschen\\_Bucht.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karte_Offshore-Windkraftanlagen_in_der_Deutschen_Bucht.png))





Abbildung 18: Satellit Sentinel 1

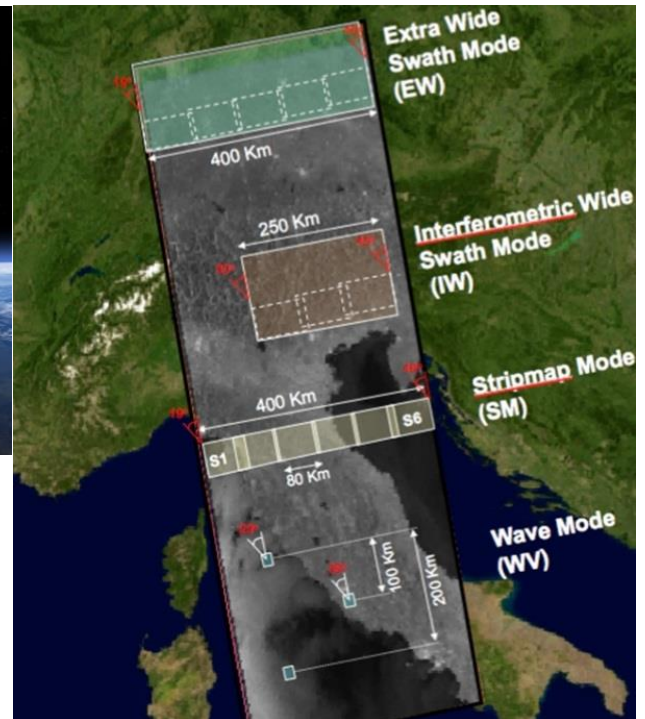


Abbildung 19: Übersicht Aufnahmemodi Sentinel 1

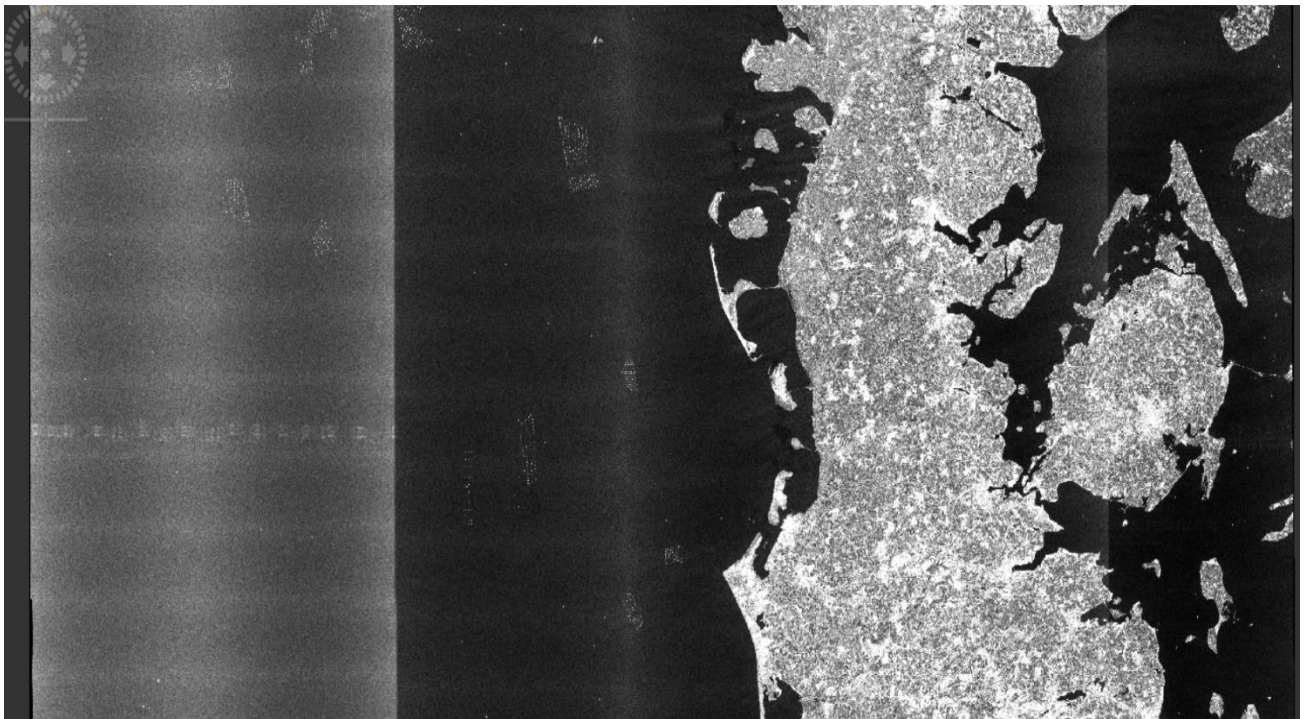


Abbildung 20: Sentinel 1 HV ExtraWide vom 11.05.16. Dänemark und Deutsche Bucht. Erkennbar sind die fünf Aufnahmestreifen des EW- Modus.

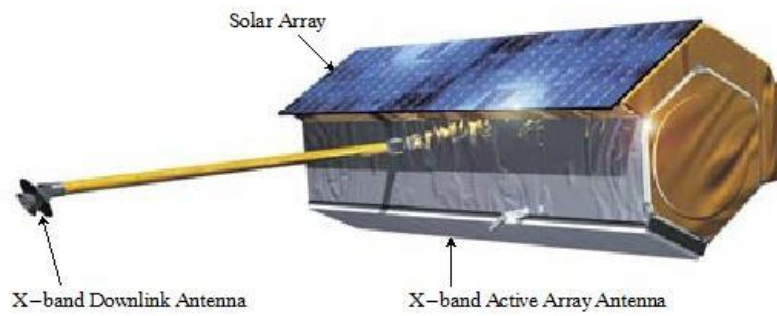


Abbildung 21: Satellit TerraSAR-X

## TerraSAR-X Acquisition Modi

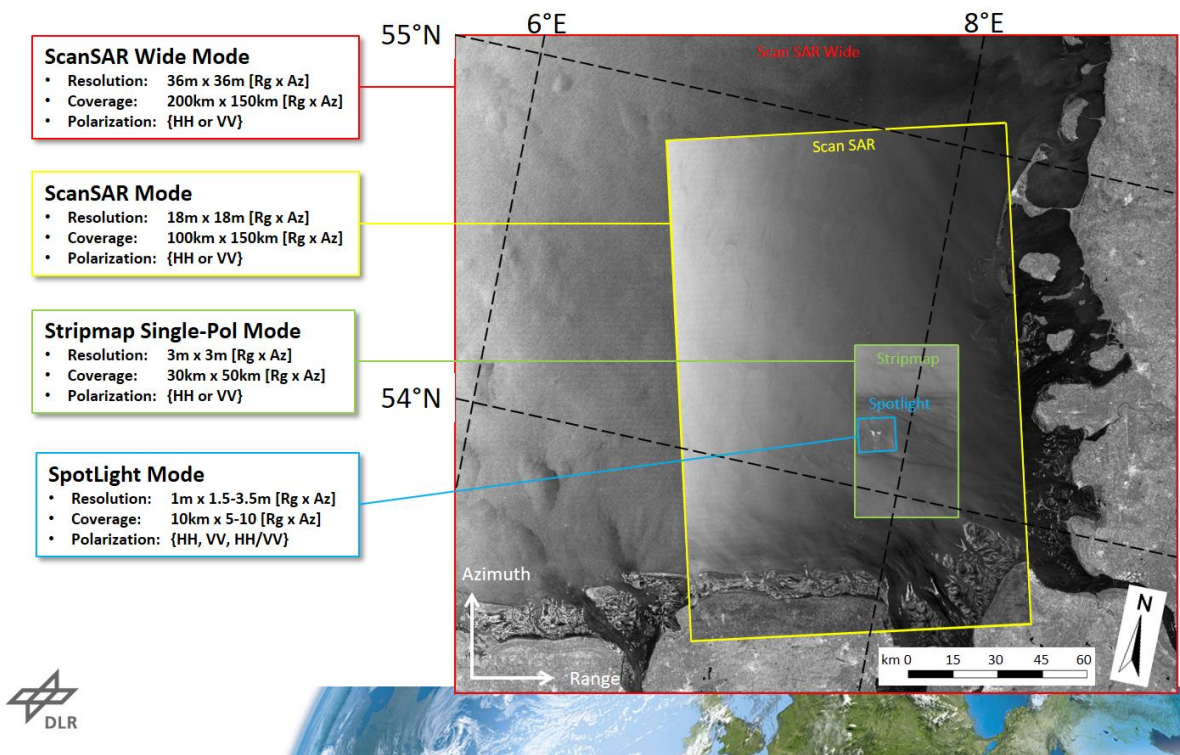


Abbildung 22: Übersicht Aufnahmemodi TerraSAR-X



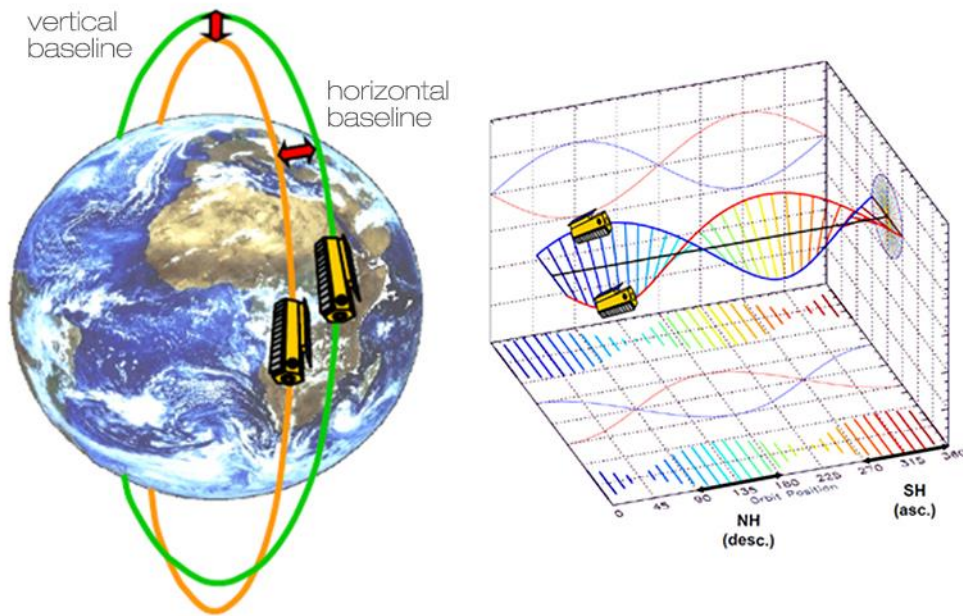


Abbildung 23: TerraSAR-X und TanDEM-X Helixformation



Abbildung 24: TerraSAR-X HH StripMap vom 10.05.16. Links Windpark BARD. Rechts Windpark Global Tech 1.



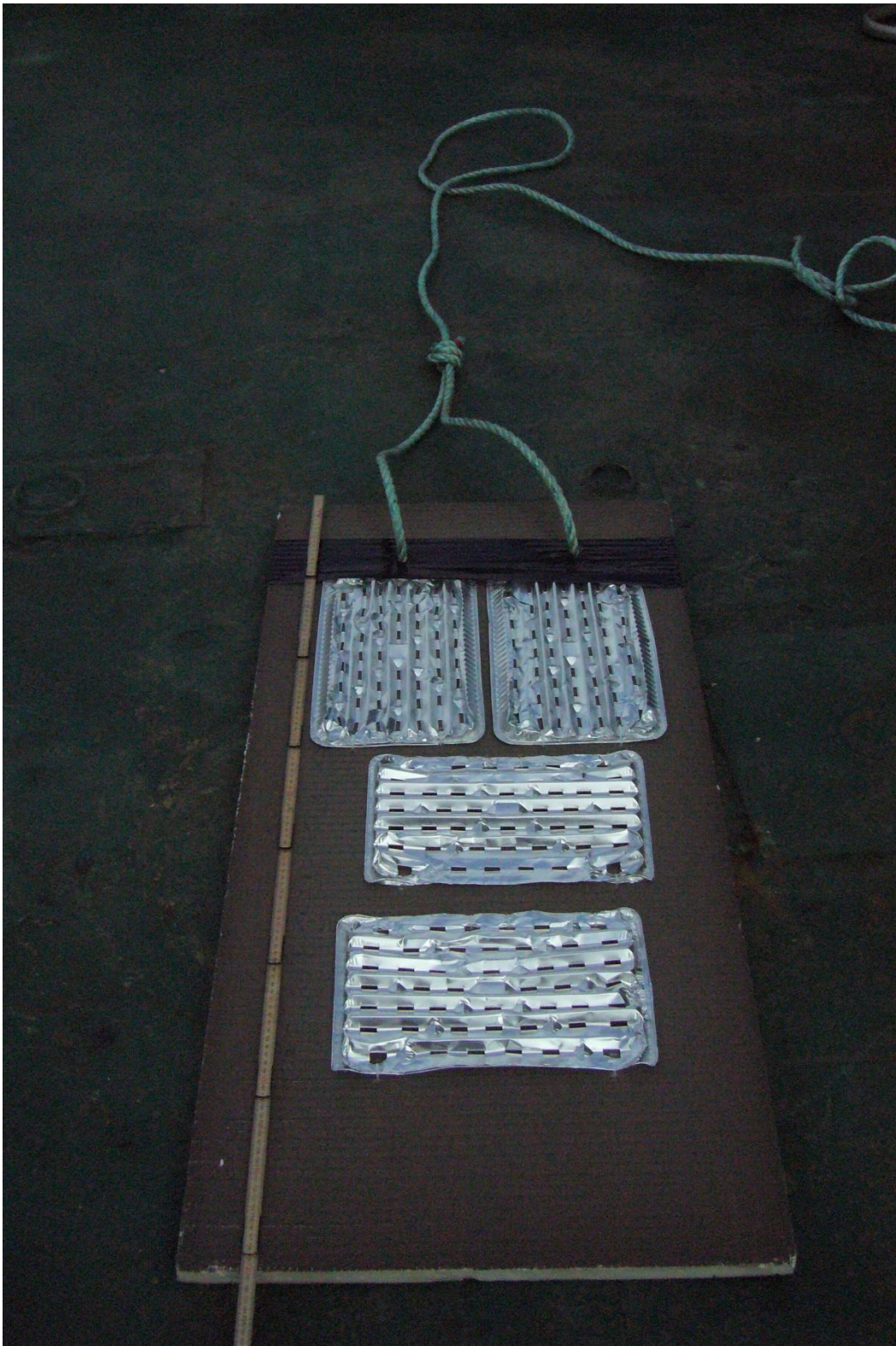


Abbildung 25: Vorversuch mit XPS Schaumplatte und Grillschalen



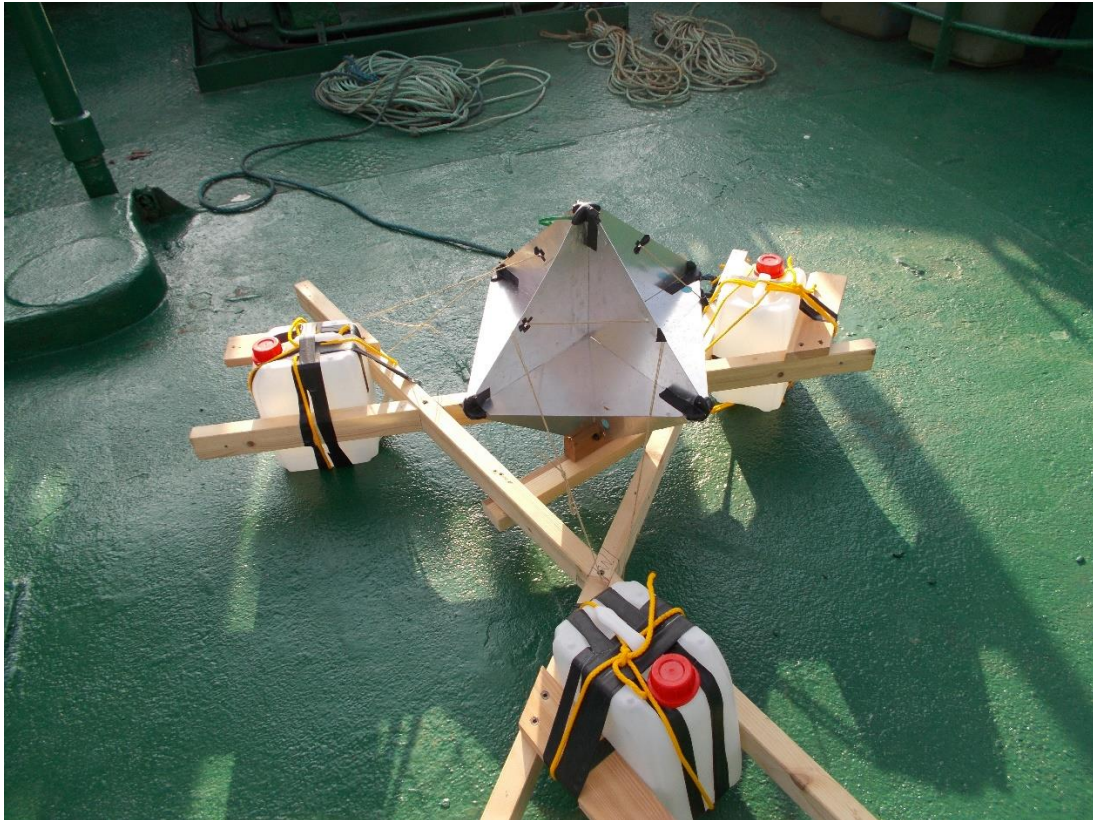


Abbildung 26: Floß mit Schwimmhilfen und Cornerreflector



Abbildung 27: Floß mit CR während des Ausbringens am 26.05.16

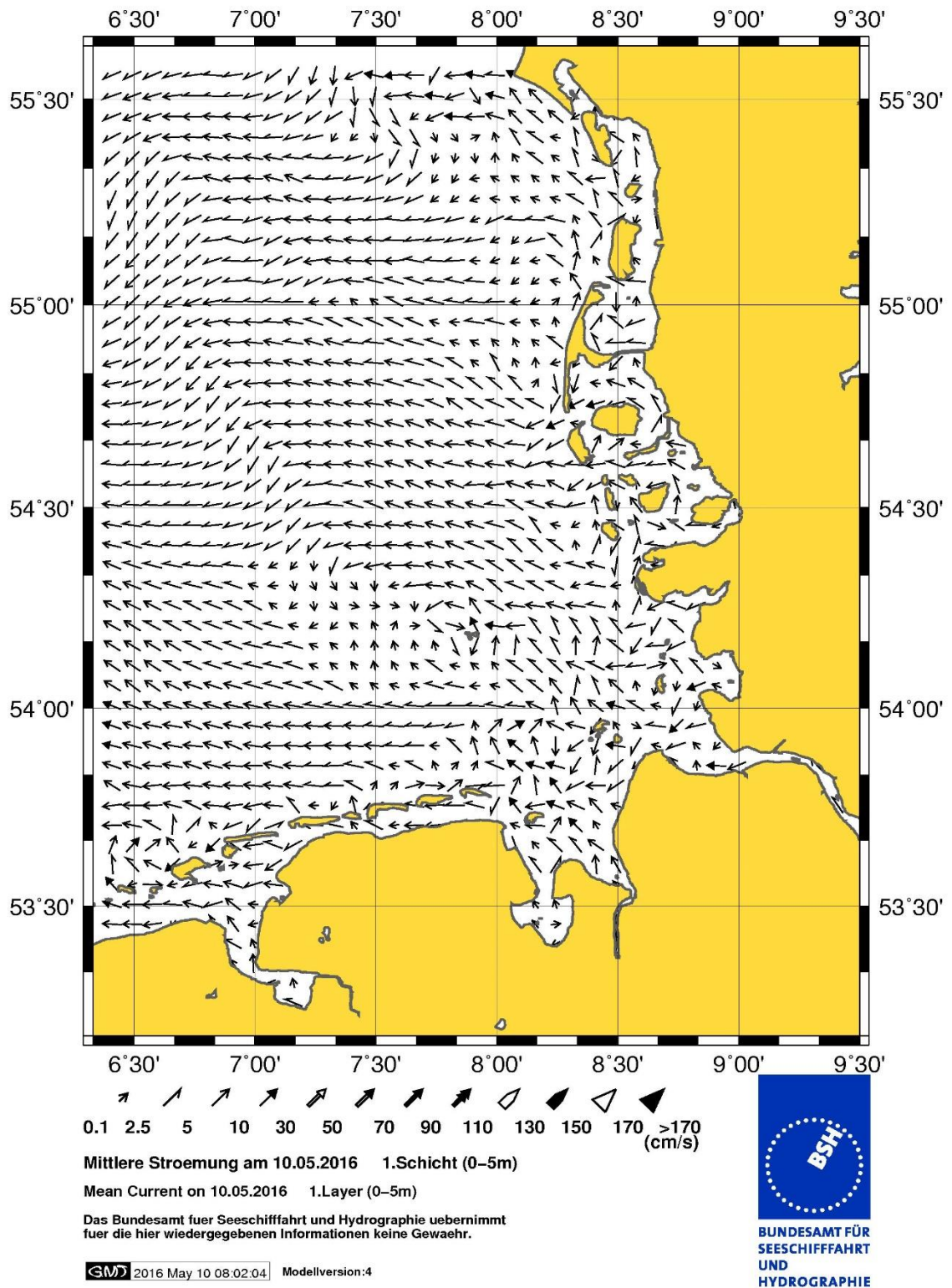


Abbildung 28: Strömungskarte Deutsche Bucht vom 10.05.16 ([www.bsh.de](http://www.bsh.de))



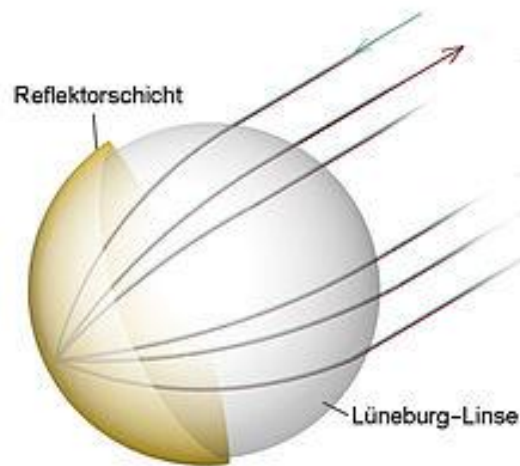


Abbildung 29: Lüneburg- Linse mit Reflektorschicht und Strahlengang  
(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Luneberglinse.jpg/220px-Luneberglinse.jpg>)